



**ITS**  
Institut  
Teknologi  
Sepuluh Nopember

**TUGAS AKHIR – TL184834**

**ANALISIS FENOMENA MULTIFASA *MINI BLAST FURNACE*  
KAPASITAS 10 TON PER HARI TERHADAP DISTRIBUSI FASA,  
TEKANAN, DAN KECEPATAN GAS DENGAN VARIASI SUDUT  
*TUYERE MENGGUNAKAN DEM-CFD COUPLED MODEL.***

**RIZKI SUMANTRI  
NRP. 0251164000027**

**Dosen Pembimbing  
Lukman Noerochim S.T, M.Sc.(Eng),Ph.D  
Sungging Pintowantoro S.T, M.T, Ph.D**

**DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020**





**TUGAS AKHIR – TL 184834**

**ANALISIS FENOMENA MULTIFASA BAGIAN BAWAH  
*MINI BLAST FURNACE* TERHADAP DISTRIBUSI FASA,  
TEKANAN, DAN KECEPATAN GAS DENGAN VARIASI  
SUDUT *TUYERE* MENGGUNAKAN DEM-CFD *COUPLED*  
*MODEL*.**

RIZKI SUMANTRI  
NRP. 0251164000027

Dosen Pembimbing  
Lukman Noerochim S.T, M.Sc.(Eng),Ph.D  
Sungging Pintowantoro S.T, M.T, Ph.D

DEPARTEMEN TEKNIK MATERIAL DAN METALURGI  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*



**FINAL PROJECT – TL 184834**

**ANALYSIS OF MULTIPHASE PHENOMENA OF TUYERE  
ANGLE VARIATION ON MINI BLAST FURNACE WITH  
CAPACITY 10 TONS ORE PER DAY TO DISTRIBUTION  
OF PHASE, PRESSURE AND SPEED OF GAS USING DEM-  
CFD COUPLE MODEL**

RIZKI SUMANTRI  
NRP. 0251164000027

Supervisors  
Lukman Noerochim S.T, M.Sc.(Eng),Ph.D  
Sungging Pintowantoro S.T, M.T, Ph.D

MATERIALS AND METALLURGICAL ENGINEERING DEPARTMENT  
Faculty of Industrial Technology and System Engineering  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember  
Surabaya 2020

*(This page is intentionally left blank)*

**ANALISIS FENOMENA MULTIFASA BAGIAN BAWAH  
MINI BLAST FURNACE TERHADAP DISTRIBUSI FASA,  
TEKANAN, DAN KECEPATAN GAS DENGAN VARIASI  
SUDUT TUYERE MENGGUNAKAN DEM-CFD COUPLED  
MODEL.**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada

Program Studi S-1 Departemen Teknik Material dan Metalurgi  
Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

Oleh:

**RIZKI SUMANTRI**  
NRP 0251164000027

Disetujui Oleh Tim Penguji Tugas Akhir:

1. Lukman Noerochim S.T, M.Sc.(Eng),Ph.D..... (Pembimbing I)
2. Sungging Pintowantoro S.T, M.T, Ph.D..... (Pembimbing II)



**SURABAYA**  
**Agustus 2020**

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

**ANALISIS FENOMENA MULTIFASA BAGIAN BAWAH  
MINI BLAST FURNACE TERHADAP DISTRIBUSI FASA,  
TEKANAN, DAN KECEPATAN GAS DENGAN VARIASI  
SUDUT TUYERE MENGGUNAKAN DEM-CFD COUPLED  
MODEL.**

**Nama** : Rizki Sumantri  
**NRP** : 0251164000027  
**Departemen** : Teknik Material dan Metalurgi  
**Pembimbing I** : Lukman Noerochim S.T, M.Sc.(Eng),Ph.D  
**Pembimbing II** : Sungging Pintowantoro S.T, M.T, Ph.D

**Abstrak**

*Terobosan yang dilakukan untuk mengolah bijih nikel laterit ialah menggunakan mini blast furnace yang dilakukan di Departemen Teknik Material Institut Teknologi Sepuluh Nopember yang berbasis eksperimen. Sehingga diperlukan analisis permodelan berbasis simulasi pada mini blast furnace dengan menganalisis fenomena multifasa pada mini blast furnace di dalamnya. Pemodelan ini menggunakan DEM-CFD coupled model (gas-solid phase) dan CFD Fluent model (gas-solid-liquid model) terhadap variasi sudut pada tuyere ( $0^\circ$ ,  $3^\circ$ ,  $7^\circ$ , dan  $11^\circ$ ). Dari hasil pemodelan menunjukkan variasi sudut tuyere berpengaruh pada distribusi fasa. Pada gas-solid phase, semakin meningkat sudut tuyere maka voidage pada coal semakin besar namun pada raceway apabila sudut terlalu tinggi atau rendah maka bentuk raceway tidak besar dan spherical, dan berlaku pada gas-solid phase dan gas-solid-liquid phase. Kecepatan gas dipengaruhi oleh variasi sudut tuyere, semakin meningkatnya sudut tuyere maka semakin tinggi nilai kecepatan gas. Nilai tekanan juga dipengaruhi oleh sudut tuyere, semakin meningkat sudut pada tuyere, maka nilai tekanan pada MBF semakin tinggi. Sehingga sudut paling optimal yang digunakan adalah sudut  $0^\circ$  pada tuyere dikarenakan kecilnya pressure drop dan kecilnya kecepatan gas.*

**Kata Kunci:** *EDEM*, *CFD*, sudut *tuyere*, *Mini Blast Furnace*, fenomena multifasa, distribusi fasa, kecepatan gas, tekanan

**ANALYSIS OF MULTIPHASE PHENOMENA OF  
TUYERE ANGLE VARIATION ON MINI BLAST  
FURNACE WITH CAPACITY 10 TONS ORE PER DAY TO  
DISTRIBUTION OF PHASE, PRESSURE AND SPEED OF  
GAS USING DEM-CFD COUPLE MODEL**

**Student Name : Rizki Sumantri**  
**NRP : 0251164000027**  
**Department : Material and Metallurgical Engineering**  
**Supervisor : Lukman Noerochim S.T, M.Sc.(Eng),Ph.D**  
**Co-Supervisor : Sungging Pintowantoro S.T, M.T, Ph.D**

**Abstract**

*A development undertaken to process lateritic nickel ore is to use a mini blast furnace at the Department of Materials Engineering Institute of Technology, November 10, based on experiments. So it is necessary to analyze modeling based on simulation on the mini blast furnace by analyzing the multiphase phenomenon inside the mini blast furnace. This modeling uses the DEM-CFD coupled model (gas-solid phase) and CFD Fluent model (gas-solid-liquid model) with respect to angle variations in the tuyere (0°, 3°, 7°, and 11°). From the results of modeling shows the variation of tuyere angle affects the phase distribution. In the gas-solid phase, the tuyere angle increases, the voidage in coal is higher. But in the raceway, if the angle is too high or low, the raceway is not large and spherical, and applies to the gas-solid phase and gas-solid-liquid phase. Gas velocity is influenced by tuyere angle variation. By increasing tuyere angle, the higher the gas velocity value in MBF multiphase. The pressure value is also influenced by the tuyere angle, the more the angle of the tuyere increases, the higher the pressure value on the MBF Multiphase. So, the most optimal tuyere angle used is 0° of tuyere angle due to less pressure drop and less velocity.*

**Keywords:** *EDEM, CFD, tuyere angle, Mini Blast Furnace, multiphase phenomena, phase distribution, gas velocity, pressure.*

## KATA PENGANTAR

Puji syukur penulis panjatkan kepada Allah SWT atas segala limpahan Rahmat, Inayah, Taufik dan Hidayah-Nya, sehingga penulis dapat menyelesaikan laporan Tugas Akhir dengan judul **“Analisis Fenomena Multifasa Bagian Bawah *Mini Blast Furnace* Terhadap Distribusi Fasa, Tekanan, Dan Kecepatan Gas Dengan Variasi Sudut *Tuyere* Menggunakan *Dem-Cfd Coupled Model*”**. Laporan ini dibuat untuk melengkapi Mata Kuliah Tugas Akhir yang menjadi salah satu kelulusan mahasiswa di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem, Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya

Penulis menyadari bahwa tanpa adanya bantuan, bimbingan, dan motivasi dari berbagai pihak, penulis tidak mungkin dapat menyelesaikan penyusunan laporan ini. Oleh sebab itu, pada kesempatan ini penulis mengucapkan terima kasih terutama kepada :

1. Allah SWT yang telah memberikan ilmu, kesempatan, berkah, kesehatan, kelancaran, dan kemudahan sehingga penulis dapat menjalankan kerja praktik sekaligus menyelesaikan laporan
2. Keluarga penulis yang selalu memberikan support berupa doa maupun materiil
3. Lukman Noerochim S.T, M.Sc.(Eng),Ph.D dan Sungging Pintowantoro, Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
4. Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D selaku Ketua Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
5. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTIRS- ITS.

6. Ir. Moch Farid, DEA. Selaku dosen wali yang selalu membantu dan mengayomi penulis selama menjadi mahasiswa di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
7. Rekan-rekan mahasiswa Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS

Segala usaha telah dilakukan dalam menyelesaikan laporan ini. Namun, Penulis menyadari bahwa penulisan laporan masih belum sempurna. Oleh karena itu, kritik dan saran yang sifatnya membangun membuat penulis bisa belajar dari kesalahan-kesalahan tersebut. Demikian, penulis berharap semoga laporan kerja praktek ini dapat bermanfaat sebagaimana mestinya.

Surabaya, 28 Juli 2020  
Penulis

Rizki Sumantri

## DAFTAR ISI

<b>HALAMAN JUDUL .....</b>	<b>i</b>
<b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>	<b>v</b>
<b>ABSTRAK .....</b>	<b>vii</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>ix</b>
<b>KATA PENGANTAR.....</b>	<b>xi</b>
<b>DAFTAR ISI.....</b>	<b>xiii</b>
<b>DAFTAR GAMBAR.....</b>	<b>xvii</b>
<b>DAFTAR TABEL .....</b>	<b>xxi</b>
<b>BAB I PENDAHULUAN</b>	
1.1 Latar Belakang.....	1
1.2 Perumusan Masalah .....	3
1.3 Batasan Masalah .....	3
1.3.1 <i>Gas-Solid Phase</i> .....	3
1.3.2 <i>Gas-Solid-Liquid Phase</i> .....	3
1.4 Tujuan Penelitian .....	4
1.5 Manfaat Penelitian .....	4
<b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA</b>	
2.1 Nikel.....	5
2.2 Batubara .....	7
2.3 <i>Blast Furnace</i> .....	9
2.4 <i>Mini Blast Furnace</i> .....	13
2.5 Kontrol Aliran Gas.....	14
2.6 <i>Tuyere</i> .....	15
2.6.1 Pengertian dan Cara Kerja.....	15
2.6.2 Pengaruh Variasi Sudut <i>Tuyere</i> .....	17
2.7 <i>Raceway</i> .....	17
2.8 Distribusi Fasa .....	18
2.9 Distribusi dan Tekanan Gas dalam <i>Blast</i> <i>Furnace</i> .....	20
2.9.1 Distribusi Tekanan.....	20
2.9.2 Distribusi Kecepatan Gas.....	22
2.10 <i>District Element Method</i> (DEM) dan <i>Solid</i> <i>Paricle Model</i> .....	25

2.11	<i>Computational Fluid Dynamic (CFD)</i> .....	28
2.11.1	Pemodelan CFD <i>Blast Furnace</i> .....	31
2.11.2	<i>Eulerian Multiphase</i> .....	32
2.12	DEM-CFD <i>Coupled</i> .....	33
2.13	Penelitian Sebelumnya .....	34
<b>BAB III METODOLOGI PENELITIAN</b>		
3.1	Diagram Alir Penelitian .....	37
3.2	Prosedur Penelitian .....	38
3.2.1	<i>Gas-Solid Phase</i> .....	38
3.2.2	<i>Gas-Solid-Liquid Phase</i> .....	38
3.3	Sifat Fisik dan Mekanik Mineral .....	39
3.4	Data Input Analisa Fluida.....	41
3.4.1	<i>Gas-Solid Phase</i> .....	41
3.4.2	<i>Gas-Solid -Liquid Phase</i> .....	42
3.5	Data Dimensi dan Operasional <i>Mini Blast Furnace</i> .....	43
3.5.1	Data Dimensi <i>Mini Blast Furnace</i> .....	43
3.5.2	Data Operasional Proses <i>Charging Burden Material</i> .....	44
3.5.3	Variasi Data.....	45
3.6	Data Spesifik <i>Burden Material</i> .....	49
3.7	Pemodelan DEM dengan EDEM 2017 .....	50
3.8	Simulasi Pada Ansys-Fluent (CFD).....	53
<b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN</b>		
4.1	Pemodelan Awal .....	55
4.2	Pengaruh Variasi Sudut <i>Tuyere</i> terhadap <i>Gas-Solid Phase</i> .....	56
4.2.1	Profil Distribusi <i>Voidage</i> .....	57
4.2.2	Profil Pembentukan <i>Raceway</i> .....	61
4.2.3	Profil Distribusi Kecepatan Gas .....	67
4.2.4	Profil Distribusi Tekanan .....	75
4.3	Pengaruh Variasi Sudut <i>Tuyere</i> terhadap <i>Gas-Solid-Liquid Phase</i> .....	83
4.3.1	Profil Distribusi Fasa pada MBF.....	84
4.3.2	Profil Distribusi Kecepatan Gas .....	89

4.3.3	Profil Distribusi Tekanan .....	95
<b>BAB V</b>	<b>KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>	<b>101</b>
5.1	Kesimpulan.....	101
5.2	Saran.....	101
<b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>		<b>103</b>
<b>LAMPIRAN .....</b>		<b>107</b>
<b>UCAPAN TERIMA KASIH.....</b>		<b>113</b>
<b>BIODATA PENULIS.....</b>		<b>115</b>

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR GAMBAR

<b>Gambar 2.1</b>	Profil lapisan nikel laterit beserta komposisi .....	6
<b>Gambar 2.2</b>	Batu bara.....	8
<b>Gambar 2.3</b>	Kualitas batu bara pada <i>blast furnace</i> .....	8
<b>Gambar 2.4</b>	Hubungan <i>voidage</i> dan <i>pressure drop</i> .....	9
<b>Gambar 2.5</b>	Sketsa <i>blast furnace</i> .....	10
<b>Gambar 2.6</b>	Arah aliran <i>blast furnace</i> .....	11
<b>Gambar 2.7</b>	Daerah pada kupola dan distribusi temperatur tiap daerah .....	13
<b>Gambar 2.8</b>	<i>Mini Blast Furnace</i> DTMM ITS .....	14
<b>Gambar 2.9</b>	Distribusi aliran gas.....	15
<b>Gambar 2.10</b>	Skema sirkulasi batubara pada depan <i>tuyere</i> .....	16
<b>Gambar 2.11</b>	Zona <i>Raceway</i> .....	18
<b>Gambar 2.12</b>	Distribusi <i>Burden Material</i> .....	20
<b>Gambar 2.13</b>	Distribusi Tekanan yang dihasilkan oleh pola aliran .....	21
<b>Gambar 2.14</b>	Perhitungan <i>Void</i> disekeliling Partikel .....	22
<b>Gambar 2.15</b>	(a) <i>Cohesive Zone</i> tipe V (b) tipe W .....	25
<b>Gambar 2.16</b>	Model gaya interaksi antar partikel .....	26
<b>Gambar 2.17</b>	Skema DEM-CFD <i>coupled</i> . .....	33
<b>Gambar 3.1</b>	Diagram alir penelitian .....	37
<b>Gambar 3.2</b>	Pemodelan geometri <i>mini blast furnace</i> 2D.....	44
<b>Gambar 3.3</b>	Geometri 3D variasi sudut <i>tuyere</i> (a.) 0°, (b.) 3°, (c.) 7°, dan (d.) 11° .....	46
<b>Gambar 3.4</b>	Geometri <i>meshing</i> 2D pada variasi sudut <i>tuyere</i> (a.) 0°, (b.) 3°, (c.) 7°, dan (d.) 11° .....	47
<b>Gambar 3.5</b>	<i>Boundary Condition</i> pada Geometri 2D MBF ....	48
<b>Gambar 3.6</b>	Bentuk <i>burden material Coal</i> (d:0.8 cm).....	49
<b>Gambar 3.7</b>	Pengaruh jumlah <i>processor</i> terhadap waktu yang dibutuhkan dalam proses simulasi .....	51
<b>Gambar 3.8</b>	Diagram alir pemodelan <i>solid particele model</i> .....	52
<b>Gambar 3.9</b>	Diagram alir pemodelan CFD software Ansys Fluent 17.1.....	53

<b>Gambar 4.1</b>	Hasil simulasi <i>bed</i> MBF (a) tampak samping, (b) tampak atas .....	55
<b>Gambar 4.2</b>	Ketinggian <i>bed</i> dengan massa <i>coal</i> 122 kg .....	56
<b>Gambar 4.3</b>	Plot perhitungan <i>voidage</i> di dasar MBF (a), 10 cm dari dasar (b), 20 cm dari dasar (c), 30 cm dari dasar (d), dan 40 cm dari dasar (e). .....	57
<b>Gambar 4.4</b>	Plot perhitungan <i>voidage</i> tampak atas .....	58
<b>Gambar 4.5</b>	Grafik perhitungan <i>voidage</i> setiap variasi sudut <i>tuyere</i> dengan metode <i>grid bin group</i> .....	58
<b>Gambar 4.6</b>	Rata-rata nilai <i>voidage</i> per variasi sudut <i>tuyere</i> .	59
<b>Gambar 4.7</b>	Profil <i>voidage</i> yang terbentuk pada variasi 0° <i>tuyere</i> (a), 3° <i>tuyere</i> (b), 7° <i>tuyere</i> (c), dan 11° <i>tuyere</i> (d).....	61
<b>Gambar 4.8</b>	Area <i>horizontal cross section</i> MBF pada <i>tuyere</i>	62
<b>Gambar 4.9</b>	Area <i>vertical cross section</i> MBF pada <i>tuyere</i> ....	62
<b>Gambar 4.10</b>	Profil <i>raceway</i> horizontal MBF terhadap distribusi <i>burden material</i> pada variasi sudut 0° <i>tuyere</i> (a), 3° <i>tuyere</i> (b), 7° <i>tuyere</i> (c), dan 11° <i>tuyere</i> (d). .....	64
<b>Gambar 4.11</b>	<i>Vertical cross section</i> MBF terhadap bentuk <i>raceway</i> pada distribusi <i>burden material</i> pada variasi sudut 0° <i>tuyere</i> (a), 3° <i>tuyere</i> (b), 7° <i>tuyere</i> (c), dan 11° <i>tuyere</i> (d).....	66
<b>Gambar 4.12</b>	Grafik volume <i>raceway</i> pada variasi sudut <i>tuyere</i> .....	67
<b>Gambar 4.13</b>	Profil distribusi kecepatan gas pada MBF pada variasi 0° <i>tuyere</i> (a), 3° <i>tuyere</i> (b), 7° <i>tuyere</i> (c), dan 11° <i>tuyere</i> (d). .....	70
<b>Gambar 4.14</b>	Metode <i>line</i> untuk perhitungan kecepatan gas terhadap ketinggian .....	71
<b>Gambar 4.15</b>	Hubungan kecepatan gas terhadap ketinggian MBF dengan pada variasi sudut 0° <i>tuyere</i> (a), 3° <i>tuyere</i> (b), 7° <i>tuyere</i> (c). 11° <i>tuyere</i> (d). .....	73

<b>Gambar 4.16</b>	Profil tekanan horizontal MBF pada variasi sudut $0^\circ$ <i>tuyere</i> (a), $3^\circ$ <i>tuyere</i> (b), $7^\circ$ <i>tuyere</i> (c), dan $11^\circ$ <i>tuyere</i> (d).....	77
<b>Gambar 4.17</b>	Profil tekanan vertikal MBF pada variasi sudut $0^\circ$ <i>tuyere</i> (a), $3^\circ$ <i>tuyere</i> (b), $7^\circ$ <i>tuyere</i> (c), dan $11^\circ$ <i>tuyere</i> (d). .....	79
<b>Gambar 4.18</b>	Hubungan tekanan terhadap ketinggian MBF pada variasi sudut $0^\circ$ <i>tuyere</i> (a), $3^\circ$ <i>tuyere</i> (b), $7^\circ$ <i>tuyere</i> (c), dan $11^\circ$ <i>tuyere</i> (d).....	82
<b>Gambar 4.19</b>	Profil fasa <i>liquid</i> MBF pada variasi sudut $0^\circ$ <i>tuyere</i> (a), $3^\circ$ <i>tuyere</i> (b), $7^\circ$ <i>tuyere</i> (c), dan $11^\circ$ <i>tuyere</i> (d). .....	84
<b>Gambar 4.20</b>	Grafik ukuran <i>raceway</i> pada fasa <i>liquid</i> terhadap variasi sudut <i>tuyere</i> .....	85
<b>Gambar 4.21</b>	Profil fasa <i>solid</i> MBF pada variasi sudut $0^\circ$ <i>tuyere</i> (a), $3^\circ$ <i>tuyere</i> (b), $7^\circ$ <i>tuyere</i> (c), dan $11^\circ$ <i>tuyere</i> (d). .....	87
<b>Gambar 4.22</b>	Grafik ukuran <i>raceway</i> pada fasa <i>solid</i> terhadap variasi sudut <i>tuyere</i> .....	88
<b>Gambar 4.23</b>	Profil vektor kecepatan gas MBF pada variasi sudut $0^\circ$ <i>tuyere</i> (a), $3^\circ$ <i>tuyere</i> (b), $7^\circ$ <i>tuyere</i> (c), dan $11^\circ$ <i>tuyere</i> (d).....	90
<b>Gambar 4.24</b>	Metode <i>line</i> untuk perhitungan nilai kecepatan gas terhadap ketinggian MBF .....	92
<b>Gambar 4.25</b>	Grafik kecepatan gas dengan pada variasi sudut $0^\circ$ <i>tuyere</i> (a), $3^\circ$ <i>tuyere</i> (b), $7^\circ$ <i>tuyere</i> (c), dan $11^\circ$ <i>tuyere</i> (d).....	94
<b>Gambar 4.26</b>	Profil distribusi tekanan MBF 2 dimensi variasi sudut $0^\circ$ <i>tuyere</i> (a), $3^\circ$ <i>tuyere</i> (b), $7^\circ$ <i>tuyere</i> (c), dan $11^\circ$ <i>tuyere</i> (d). .....	96
<b>Gambar 4.27</b>	Grafik tekanan dengan pada variasi sudut $0^\circ$ <i>tuyere</i> (a), $3^\circ$ <i>tuyere</i> (b), $7^\circ$ <i>tuyere</i> (c), dan $11^\circ$ <i>tuyere</i> (d). .....	98

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## DAFTAR TABEL

<b>Tabel 2.1</b> Gaya dan torsi dari sebuah partikel dalam analisis DEM.....	27
<b>Tabel 2.2</b> Penelitian Sebelumnya.....	34
<b>Tabel 3.1</b> Sifat fisik dan mekanik material input aplikasi EDEM .....	39
<b>Tabel 3.2</b> Sifat fisik dan mekanik pada <i>fluent</i> .....	40
<b>Tabel 3.3</b> Model dan <i>solution setup coupling</i> CFD-DEM.....	41
<b>Tabel 3.4</b> Properti Input.....	41
<b>Tabel 3.5</b> Model dan <i>solution setup fluent</i> .....	43
<b>Tabel 3.6</b> Massa <i>charging</i> untuk Mini Blast Furnace .....	45
<b>Tabel 3.7</b> Variasi sudut tuyere .....	45

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

unia pertambangan Indonesia mengalami revolusi yang signifikan sejak adanya Pengesahan UU No.4 tahun 2009 tentang Pertambangan Mineral dan Batubara oleh Pemerintah Indonesia. Sejak pengesahan tersebut, setiap perusahaan yang legal diharuskan mengolah bijih dari bahan tambang di dalam negeri sebelum di ekspor ke luar negeri. Regulasi tersebut secara otomatis juga menghapus ekspor bahan mentah tambang ke pasar global yang telah menjadi tradisi berkepanjangan, sehingga membuat keuntungan yang didapat di dalam negeri akan meningkat seiring proses bijih tambang berlangsung di dalam negeri.

Salah satu komoditas hasil tambang di Indonesia ialah Nikel dengan konsumsi tahunannya mencapai 2 juta ton dan terus meningkat drastic sejak tahun 1940-an. Nikel berasal dari sumber mineral utama yaitu jenis sulfida dan oksida, dengan presentase cadangan bijih nikel oksida jenis laterit sebesar 70% dari total cadangan bijih nikel di dunia. Indonesia menempati peringkat ke 4 yang tercatat sebagai negara potensi laterit terbesar (12%) dibawah New Macedonia (21%), Australia (20%), dan Filipina (17%) (der Ent, et al. 2013). Untuk penggunaan hasil bijih biasanya menggunakan nikel sulfide dengan presentase 60% dari total produksi nikel di dunia (Crundwell, et al. 2011). Penyebabnya ialah kadar nikel yang rendah dalam laterit (1-2,5%) dan Proses produksi dan pemurnian yang sifatnya kompleks (Dominguez, 2013 dan Farrokhpayaya et al, 2018). Mengingat fakta tersebut, membuat persediaan bijih nikel sulfide semakin menipis sehingga membutuhkan suatu terobosan berupa pengolahan bijih nikel laterit agar dapat memenuhi kebutuhan pasar global dan produksi yang lebih efektif dan efisien.

Saat ini, terobosan yang sedang dilakukan untuk mengolah bijih nikel laterit ialah menggunakan *mini blast furnace* yang dilakukan di Departemen Teknik Material Institut Teknologi

Sepuluh Nopember yang berbasis eksperimen. Sifat penelitiannya yang konvensional membuat biaya yang dikeluarkan tidak sedikit. Kemudian penelitian ini menggunakan metode *trial error*. Sehingga diperlukan suatu analisis permodelan berbasis simulasi pada *mini blast furnace* dengan tujuan meningkatkan efektifitas penelitian serta mengetahui fenomena yang terjadi pada *mini blast furnace* yang meliputi proses di dalamnya.

Metode simulasi yang familiar digunakan untuk mempelajari fenomena interaksi zat padat dengan fluida gas dan tengah populer dalam beberapa tahun terakhir adalah kombinasi model *Discrete Element Method* (DEM) dan *Finite Element Method* (FEM) dalam bentuk *Computational Fluid Dynamics* (CFD). DEM memonitor interaksi partikel-partikel solid saat proses *feeding* berdasarkan kaidah-kaidah Hukum II Newton sedangkan CFD menganalisis profil laju dan tekanan gas dalam *mini blast furnace* demi tercapainya *charging system* yang dikehendaki. Salah satu fokus simulasi DEM-CFD *coupling* untuk *blast furnace* adalah pola aliran gas-padat dan temperatur disekitarnya. Aliran fase padat-gas tersebut sangat dipengaruhi oleh proses *charging system* dan *raceway* yang proporsional. Namun, berbagai studi DEM-CFD hanya banyak difokuskan untuk mempelajari stabilitas *raceway* dan pembentukan *cohesive zone* ideal, sementara optimasi komponen yang mendukung tercapainya parameter tersebut relatif jarang dilakukan, terlebih jika simulasi tersebut diakhiri dengan proses validasi secara eksperimen. Untuk mengetahui fenomena *gas-solid-liquid phase* menggunakan CFD dimana dapat mengatur area di dalam sebagai *molten metal* atau *slag (liquid)* dan fluidanya adalah gas.

Dengan mengaplikasikan program simulasi distribusi pada burden materials dan memvariasikan laju aliran udara diharapkan akan mampu memberikan informasi empirik mengenai pengaruh laju alir udara terhadap distribusi tekanan dan laju aliran udara pada zona lainya di dalam MBF.

## 1.2 Perumusan Masalah

Adapun perumusan masalah dalam penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Bagaimana pengaruh sudut tuyere terhadap distribusi fasa pada multifasa yang terjadi di MBF?
2. Bagaimana pengaruh sudut tuyere terhadap distribusi tekanan pada multifasa yang terjadi di MBF?
3. Bagaimana pengaruh sudut tuyere terhadap kecepatan gas pada multifasa yang terjadi di MBF?

## 1.3 Batasan Masalah

### 1.3.1 *Gas-Solid Phase*

Batasan masalah dalam penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Analisis hanya dilakukan pada *bed*
2. Ukuran *Coal* dianggap homogen
3. Peran *Small Bell* diabaikan dengan persebaran *Burden Material* pada *Large Bell* dianggap telah merata
4. Reaksi di dalam *Mini Blast Furnace* diabaikan
5. Proses *melting* dari bijih diabaikan
6. Kondisi MBF dianggap *Steady State*
7. Pemodelan dilakukan secara 3 dimensi

### 1.3.2 *Gas-Solid-Liquid Phase*

Batasan masalah dalam penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Analisis dilakukan pada area *full scale* MBF dan setengah diameter asli geometri.
2. Peran *Small Bell* diabaikan dengan persebaran *Burden Material* pada *Large Bell* dianggap telah merata
3. Reaksi di dalam *Mini Blast Furnace* diabaikan
4. Proses *melting* dari bijih diabaikan
5. Kondisi MBF dianggap *Steady State*
6. Pemodelan dilakukan secara 2 dimensi.
7. *Heat transfer* dan *mass transfer* diabaikan

---

#### 1.4 Tujuan Penelitian

Adapun tujuan penelitian dalam penulisan tugas akhir ini adalah:

1. Menganalisis pengaruh sudut *tuyere* terhadap distribusi fasa pada multifasa yang terjadi di MBF.
2. Menganalisis pengaruh sudut *tuyere* terhadap distribusi tekanan pada multifasa yang terjadi di MBF.
3. Menganalisis pengaruh sudut *tuyere* terhadap kecepatan gas pada multifasa yang terjadi di MBF.

#### 1.5 Manfaat Penelitian

Manfaat yang didapatkan dari penelitian ini adalah mengetahui fenomena multifasa yang terjadi pada bagian bawah MBF secara permodelan sehingga mendapatkan pendekatan terhadap penelitian sesungguhnya dan menjadi acuan untuk penelitian MBF selanjutnya.

## BAB II TINJAUAN PUSTAKA

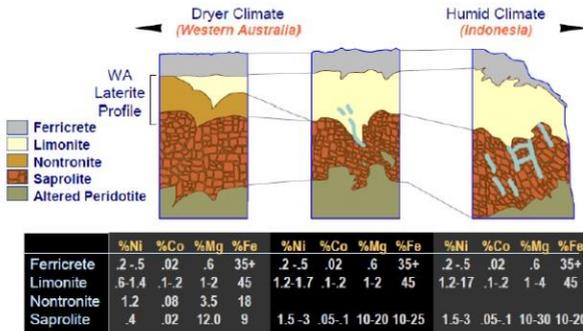
### 2.1 Nikel

Nikel (nomor atom 28; nomor massa 56,6934) termasuk dalam golongan VIIIB dalam tabel periodik unsur bersama besi dan kobalt dan dikenal dengan sebutan “Tiga Serangkai”, sehingga sifat ketiganya cenderung mirip. Konfigurasi elektron kulit terluar dari unsur nikel adalah  $3d^8 4s^2$  yang membuat valensinya +2. Karakteristik fisik dari logam dengan densitas  $8,92 \text{ g/cm}^3$  ini antara lain memiliki temperatur lebur sebesar  $1455^\circ\text{C}$  dan titik didih  $\pm 2915^\circ\text{C}$  (Polyakov 2013)

Sumber nikel terbesar di alam adalah mineral nikel laterit dan nikel sulfida. Sekitar 60% deposit bijih nikel timbul dalam wujud laterit, sedangkan 40% sisanya berupa sulfida. Laterit umumnya terbentuk di dekat permukaan akibat pelapukan batuan ultramafik yang kaya akan besi dan magnesium. Mineral laterit yang mengandung nikel umumnya terkandung dalam *limonit* dan *goethite*, kelompok *nickeliferous* dengan rumus senyawa  $(\text{Fe},\text{Ni})\text{O}(\text{OH})$ , dan biasanya ditambang dengan metode penambangan terbuka. Berbanding terbalik dengan laterit, mineral sulfida nikel biasanya ditemukan di bawah tanah dan umumnya membutuhkan infrastruktur pertambangan dan pekerja bawah tanah dalam proses ekstraksinya. Mineral utama sulfida antara lain *pentlandite* ( $[\text{Fe},\text{Ni}]_9\text{S}_8$ ), *pyrrhotite* ( $\text{Fe}_7\text{S}_8$ ), *chalcopyrite* ( $\text{CuFeS}_2$ ) (Hoatson 2006) dan (Khoo, et al. 2017)).

Indonesia merupakan salah satu produsen bijih nikel terbesar di dunia, dan memiliki sekitar 16% dari total sumber daya nikel global dalam bentuk bijih laterit dimana tersebar luas dan tersebar di antara pulau-pulau Kalimantan, Sulawesi, Halmahera, Gag, dan Papua. Sifat-sifat bijih laterit berbeda, tergantung pada asal bijih nikel yang dihasilkan termasuk pada bijih saprolitik yang berada di Indonesia. Bahan kimia dan mineral komposisi laterit dari asal yang berbeda atau bahkan dari berbeda kedalaman di satu area bisa sangat bervariasi (Astuti 2018)

Klasifikasi yang dilakukan oleh beberapa sumber menjelaskan bahwa profil lapisan nikel dapat dijelaskan pada Gambar 2.1.



**Gambar 2.1** Profil lapisan nikel laterit beserta komposisi (Dalvi, Bacon and Osbourne 2004)

Dua metode utama dalam produksi nikel adalah ekstraksi pirometalurgi dan hidrometalurgi. Tahapan ekstraksi secara pirometalurgi umumnya terdiri atas *roasting*, *smelting*, *converting* dan *refining*. Laterit lebih mudah dilebur menjadi paduan feronikel dibanding logam nikel ditinjau dari aspek termodinamika (Swinbourne 2014). Feronikel merupakan nikel yang mengandung paduan sekitar 25% nikel dan 75% besi dan material lain seperti kromium dan silika dalam jumlah yang sangat kecil. Dipihak lain, proses hidrometalurgi biasanya melibatkan *leaching* amonia dari *roasted material* atau *leaching* asam sulfat bertekanan tinggi yang diikuti dengan ekstraksi pelarut, *electro-winning*, dan sintering serbuk logam menjadi nikel padat. Dalam aplikasinya, teknik pirometalurgi digunakan untuk bijih dengan kadar nikel lebih dari 1,7% sedangkan hidrometalurgi untuk kadar di bawah 1,5%. Karena sulfida berpeluang mengandung kadar nikel dan energi internal yang tinggi, tipe pirometalurgi lebih direkomendasikan penggunaannya sebab relatif kurang kompleks dibanding hidrometalurgi. Sementara itu, aspek mineralogi laterit membuat

bijih sulit diupgrade sebelum proses *leaching*. Hal ini dikarenakan mineral nikel tersebar dalam jumlah yang sangat kecil diseluruh bijih, sehingga produksi efisien dan ekonomis secara pirometalurgi hanya dapat dilakukan jika bijih mengandung kadar nikel yang lebih tinggi (Khoo, et al. 2017)

## 2.2 Batubara

Batu bara merupakan material yang sangat penting bagi produksi logam, sekitar 64% dari produksi logam di seluruh dunia berasal dari produk yang dibuat di *blast furnace* yang menggunakan batu bara. Suatu *blast furnace* menggunakan kokas (dibuat dari batu bara kokas khusus) dan sedikit batu gamping. Beberapa tanur menggunakan batu bara ketel uap yang lebih murah - disebut *pulverised coal injection* (PCI - injeksi serbuk batu bara) - untuk menghemat biaya.

Kokas terbuat dari batu bara, yang memiliki kandungan fisika tertentu yang membuat batu bara menjadi lembut, mencair dan kemudian membeku kembali menjadi bongkahan keras namun berpori pada saat dipanaskan tanpa udara. Batu bara kokas harus selalu memiliki kandungan sulfur dan fosfor yang rendah dan karena batu bara kokas relatif langka, maka harganya lebih mahal daripada batu bara ketel uap yang digunakan pada pembangkit listrik. (*World Coal Institute*, 2006)

Batu bara memenuhi tiga fungsi utama dalam *blast furnace* antara lain menghasilkan panas, sebagai agen pereduksi dan sebagai pendukung struktur material. Lebih lanjut batu bara berperan sebagai penyedia zat karbon dalam proses karbonisasi. Panas dihasilkan dari gasifikasi batu bara di depan tuyer (atau biasa disebut *Raceway*) dan terutama dibawa oleh gas panas yang disemburkan. Panas yang dihasilkan dari pembakaran batu bara 80% digunakan dari keseluruhan kebutuhan panas *blast furnace*. Panas dibutuhkan untuk reaksi endotermik, pemanasan awal dan peleburan masukan pemanasan produk cair. Bentuk batu bara dapat dilihat pada Gambar 2.2.



**Gambar 2.2** Batu bara

Karbon dan oksigen bereaksi membentuk karbon monoksida secara langsung:



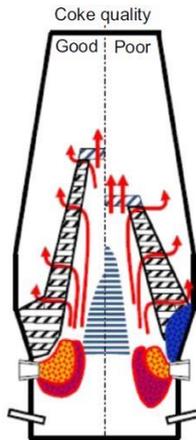
atau pada temperatur tinggi melalui reaksi *Boudouard* :



dan kemudian reaksi *solution loss*

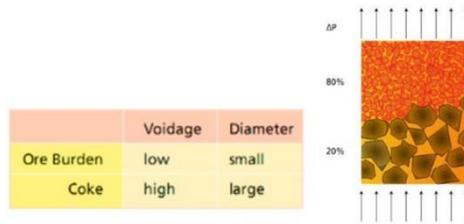


Karbon monoksida (juga gas hidrogen) berperan sebagai agen pereduksi karena kebutuhan konsumsinya lebih sedikit jika dibandingkan reaksi langsung batu bara dengan *ore* yang membutuhkan panas lebih banyak karena reaksi endotermik.



**Gambar 2.3** Kualitas batu bara pada *blast furnace*  
(Babich and Senk 2019)

Batu bara juga membentuk permeabilitas gas dalam *blast furnace* dengan dibentuknya layer antara batu bara dan *ore*. Pada bagian layer batu bara akan terbentuk aliran gas yang teratur dan mengenai *ore*. Hal ini dikarenakan ukuran batu bara memiliki diameter yang lebih besar dibanding *ore* sehingga *voidage* (rongga antara batu bara) akan lebih besar sehingga gas lebih banyak mengalir ke daerah *voidage* besar tersebut, seperti pada Gambar 2.3. Hal ini juga membantu dalam pembentukan gas CO yang lebih efektif. Adanya *voidage* ini juga berfungsi untuk aliran *liquid slag* dan besi cair ke bagian *hearth*. (Rizki F 2017)



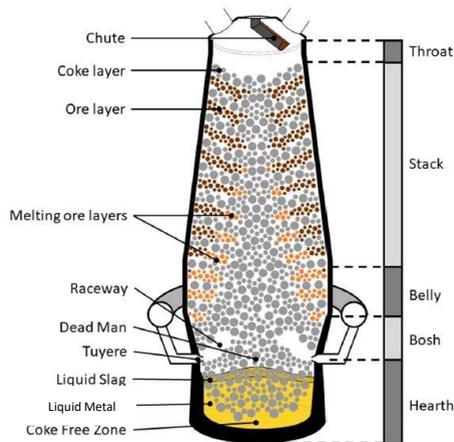
**Gambar 2.4** Hubungan *voidage* dan *pressure drop*  
(Geerdes, et al. 2009)

Terdapat perbedaan antara lapisan ore dan lapisan kokas. Perbedaan ini terjadi akibat adanya perbedaan ukuran diameter *ore* dan kokas. Pada Gambar 2.3 terlihat bahwa lapisan *iron ore* memiliki hambatan terhadap aliran gas yang lebih tinggi dibandingkan dengan hambatan pada lapisan kokas. Profil hambatan gas atau biasa disebut dengan *pressure drop* menunjukkan bagaimana gas mengalir di dalam *blast furnace*. (Geerdes, et al. 2009)

### 2.3 *Blast Furnace*

*Blast furnace* (BF) adalah reaktor kimia yang sangat efisien dan memainkan peran utama dalam proses pembuatan besi hingga saat ini dan akan terus melakukannya dalam waktu dekat. Sayangnya, karena merupakan reaktor yang intensif energi,

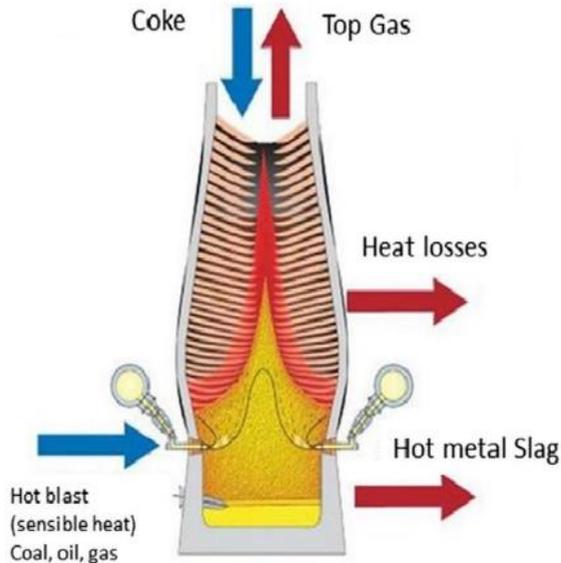
terhitung lebih dari 90% dari konsumsi energi di pabrik baja. Akibatnya, meningkatkan efisiensi aplikasi energi dalam BFs secara langsung menentukan konsumsi energi dan emisi gas dalam industri pembuatan besi (Zhuo and Shen 2019).



**Gambar 2.5** Sketsa *blast furnace*  
(Zhuo and Shen 2019)

Sketsa dari *blast furnace* ditunjukkan oleh Gambar 2.5, terdapat bagian-bagian *blast furnace* yang diklasifikasikan berdasarkan bentuknya. Bagian atas yang berbentuk silinder disebut *throat* yang dilindungi oleh batu bata tahan api. Dibawahnya, terdapat *shaft*, daerah yang semakin ke bawah meningkat ukuran diameternya dan terus memanjang hingga ke bagian silindris yang dikenal dengan sebutan *belly*. Bagian setelah *belly* dinamai *bosh* dan pada zona ini diameter menjadi lebih kecil serta berfungsi sebagai tempat masuknya uap panas (*blast*). Daerah paling bawah diistilahkan dengan *hearth*, tempat dimana logam cair dan *slag* terakumulasi dalam *coke bed*. Tidak hanya di luar, bagian dalam *blast furnace* juga mengalami zonasi sebagai berikut (Mitra 2016):

- Lumpy zone*, bagian paling atas dimana *burden materials* masih berbentuk solid.
- Cohesive zone*, daerah dimana *burden materials* mulai melebur dan menurun permeabilitasnya.
- Active coke zone*, bagian dimana terjadi pengisian batu bara secara konstan karena *burden material* bergerak ke daerah pembakaran di dekat *tuyere*.
- Deadman*, bagian pada inti daerah *bosh* dimana batu bara tidak bereaksi dengan cepat bahkan tergelong statis.
- Raceway*, area dimana terdapat kekosongan yang berbentuk cekungan akibat hembusan uap panas melalui *tuyere* dan merupakan bagian terpanas dalam *blast furnace*.

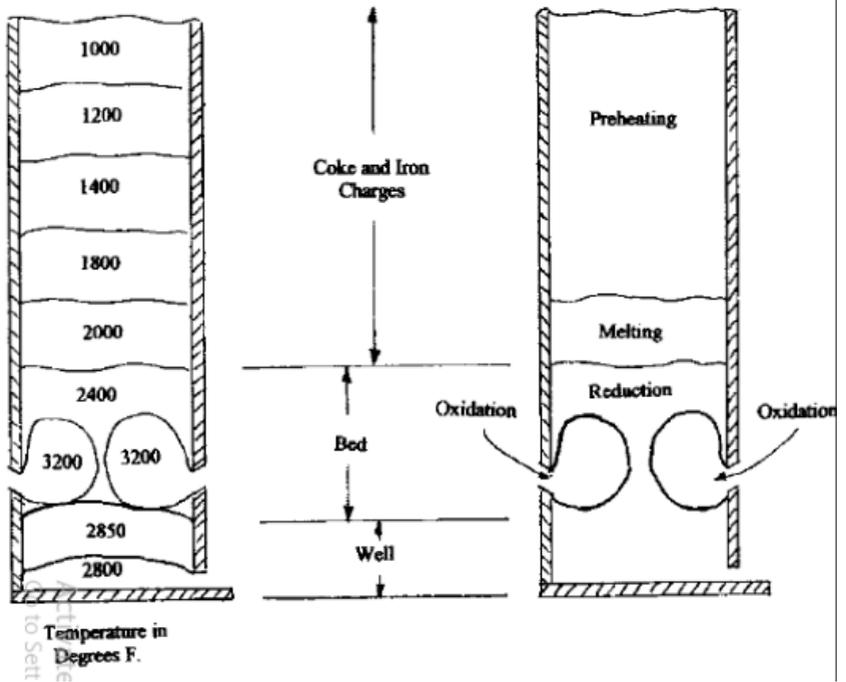


**Gambar 2.6** Arah aliran *blast furnace*  
(Geerdes, et al. 2009)

Dalam rangka mempermudah proses kontrol dan menekan biaya investasi, dikembangkan *Mini Blast furnace* untuk pengolahan bijih dengan kadar rendah sekaligus sebagai instrumen percobaan representatif sebelum *scale up* ke industri skala besar. Pada prinsipnya, ukuran menjadi hal paling fundamental yang membedakan *mini blast furnace* dengan *blast furnace*. *Mini blast furnace* juga merupakan reaktor *counter-current* yang berbentuk silinder baja dan bagian dalamnya diinsulasi dengan material refraktori agar tidak terdegradasi dalam temperatur tinggi. Konstruksi alat ini mirip dengan *cupola* dimana terdapat 5 daerah yakni:

- a. *Well* adalah daerah yang ada dibagian paling bawah *cupola*, berfungsi untuk menyimpan lelehan besi sampai *cupola* di tap.
- b. Daerah pembakaran adalah daerah dimana udara ditiupkan kedalam *cupola* dan bereaksi dengan karbon monoksida sehingga tercipta panas untuk menjalankan *cupola*,
- c. Daerah reduksi adalah tempat dimana oksida besi direduksi menjadi besi daerah ini berada diluar daerah pembakaran.
- d. Daerah pelelehan adalah daerah diantara daerah reduksi dan daerah preheat, daerah ini dibatasi oleh titik teratas coke bed dan titik awal terjadinya pelelehan besi.

Daerah *pre-heat* adalah daerah diatas daerah *melting*, pada daerah ini *burden material* harus mengalami peningkatan dari temperatur kamar ke temperatur lebur dari besi. Peningkatan temperatur ini terjadi karena transfer panas dari udara yang datang dari bawah atau daerah pembakaran ke atas. Pada saat udara memasuki daerah *preheat* temperaturnya adalah sebesar 2200 F namun saat keluar dari area *preheat* temperature dari udara hanya 400 F. Daerah *preheat* amat penting adanya pada proses di *cupola* karena lelehan yang baik membutuhkan *preheat* yang baik pula, selain itu kadar air dan material *volatile* juga habis di area *preheat* sehingga proses dapat berjalan dengan lebih baik. (Chastain 2000).

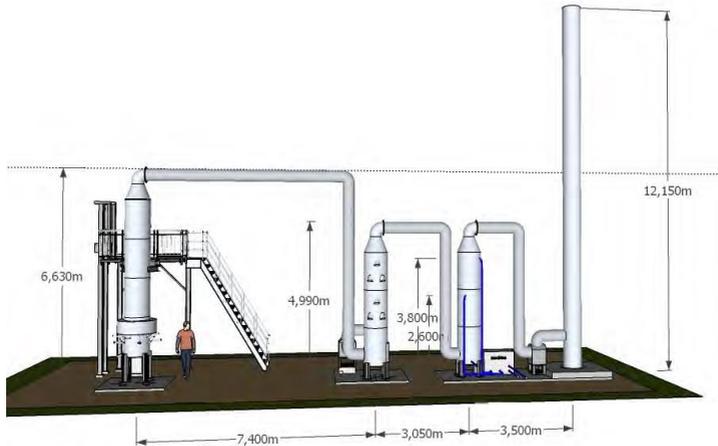


**Gambar 2.7** Daerah pada kupola dan distribusi temperatur tiap daerah  
(Chastain 2000)

## 2.4 *Mini Blast Furnace*

*Mini blast furnace* yang digunakan adalah *mini blast furnace* yang telah dikembangkan dan diberi komponen penunjang untuk meningkatkan efisiensi dan sifat ramah lingkungan. Komponen yang ditambahkan adalah *water scrubber*, suatu komponen yang berguna untuk mereduksi *off gas* hasil reaksi *smelting* sehingga dapat dilepas ke udara bebas. Mekanisme kerja dari *water scrubber* adalah dengan cara mengalirkan gas-gas mengandung logam yang terbawa ataupun uap logam kedalam drum-drum berisi air. Air

kemudian bereaksi dengan spesi-spesi logam sehingga relatif lebih aman ketika dilepas di udara bebas.



**Gambar 2.8** Mini Blast Furnace DTMM ITS

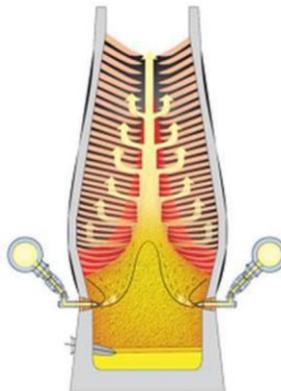
## 2.5 Kontrol Aliran Gas

Aliran gas optimal dalam *blast furnace* yang dioperasikan dengan produktifitas tinggi dan kecepatan input batu bara yang rendah memiliki daerah zona kohesif berbentuk V terbalik. Tetapi, gas reduktor yang melalui pusat furnace (daerah pusat dimana tidak terdapat bijih besi) tidak dimanfaatkan dengan optimal. Kehilangan gas "tidak terpakai" ini harus diminimalkan.

Jika aliran gas sentral terlalu tinggi, maka aliran gas di sepanjang dinding menjadi terlalu kecil untuk pemanasan, reduksi dan peleburan bijih besi dan akibatnya bagian bawah zona kohesif semakin mendekati *tuyere*. Dalam kondisi ini kecepatan pemakaian reduktor akan meningkat dan kemungkinan besar terjadi kerusakan *tuyere*. (Geerdes, et al. 2009).

Sangat penting aliran *gas central* mampu mendistribusikan aliran gas melalui celah batu bara ke lapisan *ore*. Oleh karena itu, permeabilitas bagian batu bara pada bagian *centre* tidak boleh

terlalu tinggi, yang berarti bahwa diameter batu bara pusat tidak boleh terlalu besar. Di lain sisi, jika aliran gas pada bagian centre tersebut (sebagian) ditahan, bagian gas yang relatif besar lewat sepanjang dinding *furnace*. Reaksi reduksi menjadi melambat. Dalam situasi ini, aliran gas pada bagian *centre* menjadi rendah dan terjadi *heat-loss* yang tinggi. Pengalaman menunjukkan bahwa aliran gas di dinding *furnace* dan aliran gas pada bagian *centre furnace* sangat berkorelasi. Pengontrolan aliran gas didasarkan pada keseimbangan antara aliran gas pusat dan dinding dengan optimal.



**Gambar 2.9** Distribusi aliran gas  
(Geerdes, et al. 2009)

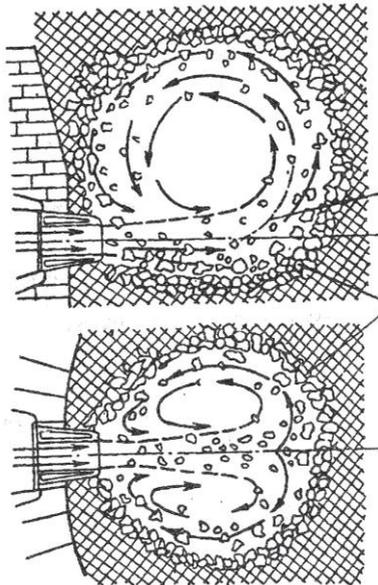
## 2.6 *Tuyere*

### 2.6.1 Pengertian dan Cara Kerja

*Tuyere* merupakan elemen penting *blast furnace* yang menjadi jalur dimasukkannya uap panas (*blast*) untuk memulai proses pembakaran batu bara. Tidak hanya itu, pembakaran didalam maupun di sekitar *tuyere* juga dipicu oleh bahan bakar lain seperti bahan bakar minyak, gas alam dan serbuk batu bara.

Interaksi dengan kalor dalam waktu lama membuat *tuyere* berpotensi mengalami degradasi. Olehnya itu, sebagian besar *tuyere* komersial dalam dunia industri dilengkapi dengan sistem pendingin yang memanfaatkan aliran air. Material untuk konstruksi *tuyere* adalah tembaga karena sifatnya pendinginannya yang baik dan relatif murah dari segi biaya (Farkas and Móger 2012)

Proses oksidasi terjadi di zona *raceway* di depan setiap *tuyere* di mana kokas dan zat pereduksi tambahan disuntikkan dalam oksigen ledakan panas. Volume total zona pengoksidasi atau *raceway* biasanya tidak melebihi 1% dari volume dalam BF. Namun demikian, zona ini adalah wilayah yang vital karena daerah tersebut memasok proses dengan panas dan mengurangi gas. (Babich and Senk 2019)



**Gambar 2.10** Skema sirkulasi batubara pada depan *tuyere*  
(a) tampak depan (b) tampak belakang (Babich, 2015)

### 2.6.2 Pengaruh Variasi Sudut *Tuyere*

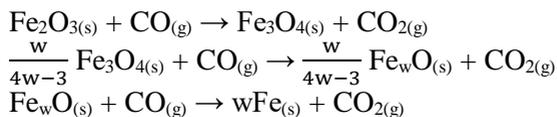
Kecenderungan ke bawah *tuyere* menstabilkan aliran udara dan kemudian *raceway* menjadi stabil. Namun jika sudut kemiringan terlalu tinggi, aliran menjadi tidak stabil oleh berbagai kondisi di dekat bagian bawah *blast furnace*. Perbedaan antara kedalaman dan ketinggian *raceway* berkurang dengan meningkatnya sudut ke bawah dari horizontal. Itu menjadi nilai minimum pada 7 derajat. Laju aliran partikel kokas dari area sentral *blast furnace* dan lebar alirannya meningkat dengan meningkatkan sudut ke bawah dan mencapai nilai maksimum di dekat 11 derajat. *Raceway* akan stabil pada 7 derajat akan membuat aliran udara seragam (Umekage, et al. 2007).

*Tuyere* dengan variasi sudut  $11^\circ$  memiliki *combustion zone* paling tinggi dikarenakan laju aliran udara tersebut mengalami turbulensi lebih banyak, seiring dengan peningkatan sudut *tuyere* (Ghofoer 2018).

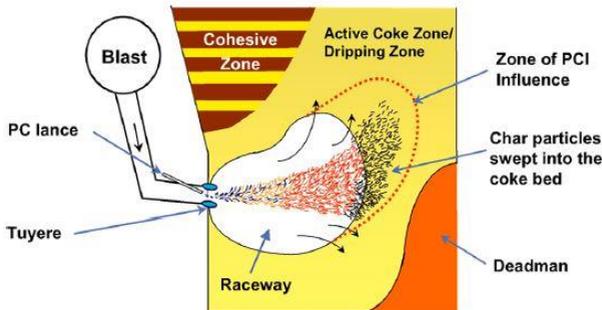
### 2.7 *Raceway*

*Raceway* adalah zona yang paling signifikan dipengaruhi oleh *tuyere*, oleh karena itu pada zona ini terdapat hembusan fluida/udara bertekanan dan berkecepatan tinggi sehingga banyak terdapat kekosongan atau *void*. Zona *raceway* termasuk zona dengan temperatur tertinggi di dalam *mini blast furnace*, energi panas yang terbentuk akan memanaskan batu bara dan terjadi reaksi sehingga terbentuk karbon monoksida dan karbon dioksida.

Karbon monoksida merupakan gas reduktan yang dapat mereduksi oksida besi secara tak langsung. Reduksi oksida besi secara tak langsung terjadi dalam bentuk tiga tahapan reaksi kimia berikut ini. (Rizki, 2017)



Panas dari reaksi di area *raceway* membentuk gas panas yang akan bergerak ke atas sehingga berperan menjadi pemanas awal material umpan saat masuk pada bagian atas *blast furnace*.



**Gambar 2.11** Zona *Raceway*  
(Miao, et al. 2017)

## 2.8 Distribusi Fasa

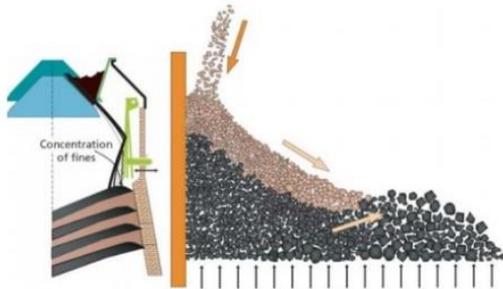
Distribusi beban bahan baku pada tingkat persediaan dari *Mini Blast Furnace* sangat penting untuk operasi yang lancar dan efisien. Setelah turun dari *chute* yang berputar, partikel tersebut membentuk permukaan stok dan membentuk profil pada layer. Lapisan material dan celah udara berperan penting pada kontak gas padat. Efisiensi reduksi dari tungku bergantung pada hal ini. Estimasi dan prediksi profil layer dalam arah radial tungku sangat penting untuk mengendalikan distribusi bijih kokas dan celah udara. (Samik, et al. 2014)

Untuk pengoperasian tungku dengan efisiensi tinggi dan konsumsi kokas yang rendah, perlu dipastikan keseragaman distribusi material dan gas lebih lingkaran tanur dan penempatan radius *throat* yang optimal. Hal ini bertujuan untuk mengurangi konsumsi spesifik *coke*, dengan cara perbaikan distribusi saat proses sebesar 7%. Tidak ada masalah dengan memberikan beban bijih tertentu di atas tungku penampang, saat melakukan sebuah proses. Desain matriks dari pemuatan muatan di 11 titik posisi

sudut naman di *blast furnace* dari Kanada (Hamilton Works Company), Jerman (Perusahaan Arcelor Mittal Eisenhu), Jepang, Spanyol dan Ukraina memperbolehkan untuk distribusi masuk yang berbeda di atas radius atas tungku dan melakukan peleburan dengan parameter teknis dan ekonomi yang tinggi. Namun sulit untuk memberikan distribusi masuk yang seragam di atas lingkaran karena berbagai alasan. Misalnya, bahan bijih besi (burden dan pelet) kacang coke atau fraksi coke, kuarsit, bahan pencuci, dan juga seperti bijih besi atau mangan yang digunakan dalam komposisinya di JSC "MMK". Selanjutnya bahan dimuat ke *blast furnace* dengan tidak seragam, dalam ukuran yang tidak teratur dan berbeda kualitasnya. Itulah sebabnya, komponen *burden* bergerak dari *throat* ke permukaan lapisan terbentuk secara bervariasi, sehingga susunannya tidak merata sehingga hal ini merupakan tantangan dari proses pada *blast furnace*. Untuk menghilangkan ketidakseragaman ini diperlukan untuk mengevaluasi sumber kemunculannya. (Sibatullin, et al. 2017)

Distribusi gas diatur oleh pola resistensi dari lapisan *burden* dan oleh jumlah *burden ore* yang mencapai pusat, pola distribusi *burden material* dapat dilihat seperti pada Gambar 2.12. Perubahan distribusi *burden* dapat mempengaruhi perubahan aliran gas. Aliran gas dapat mempengaruhi masalah operasional, seperti *burden level* yang rendah atau masalah pada *casthouse*. Sehingga *burden material* penting untuk diatur agar aliran gas yang baik dan *furnace* dapat beroperasi optimal. Tebal lapisan diatur untuk memperoleh permeabilitas layer batu bara yang baik dan lapisan *ore* yang tipis membuat layer *ore* mencair dengan baik (Geerdes, et al. 2009)

Distribusi *molten metal* tertinggi berada di bagian dasar *blast furnace* karena merupakan area *hearth*, dimana area tersebut menyimpan *molten metal* hasil reduksi pada MBF sehingga menumpuk di dasar MBF dan keluar melewati *ladle*. (Shen, 2013)



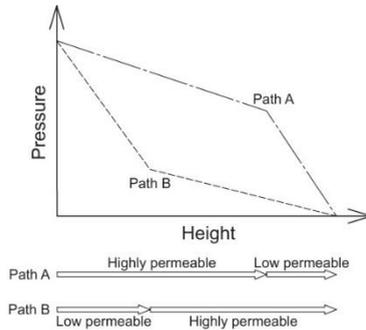
**Gambar 2.12** Distribusi *Burden Material*  
(Geerdes, et al. 2009)

## 2.9 Distribusi dan Tekanan Gas dalam *Blast Furnace*

### 2.9.1 Distribusi Tekanan

Di dalam *blast furnace*, gas pereduksi mengalir melalui *bed* penuh yang terdiri dari partikel kokas dan bijih. Gas reduksi dan perilaku alirnya bisa dijelaskan oleh persamaan kontinuitas dan persamaan gerakan. Untuk kondisi *blast furnace*, persamaan ini mengambil memperhitungkan kekosongan dan hambatan aliran.

Salah satu kemungkinan mekanisme untuk membentuk distribusi tekanan dengan skema aliran potensial adalah pembentukan *path*. Gambar 2.13 menunjukkan konsepnya dari mekanisme ini. Dalam mekanisme ini, dua jalur aliran, A dan B, yang tidak memiliki efek timbal balik yang dihasilkan dalam *bed*. Kedua jalur ini terhubung satu sama lain di sisi bawah dan sisi atas. Maka distribusi tekanan akan sama pada di kedua ujung jalur. Arah aliran di jalur ini adalah sama dan tekanan akan turun pada saat di atas. Kedua jalur ini memiliki pola permeabilitas yang berbeda. Di jalur A, bagian bawah sangat permeabel dan atas melwati permeabel yang rendah. Dalam pengaturan ini, gradien tekanan di wilayah bawah lebih kecil dan



**Gambar 2.13** Distribusi Tekanan yang dihasilkan oleh pola aliran (Kamata, et al. 2015)

di daerah atas lebih besar. Berbeda dengan jalur B memiliki daerah bawah yang mempunyai permeabel rendah dan sebaliknya sangat permeabel daerah atas. Pada perbandingan jalur ini, tekanan masuk jalur A selalu tinggi pada ketinggian yang sama. *Path* seperti ini seperti pada *blast furnace*, di samping itu, jalur B menyentuh dinding tungku di bagian bawah tungku, dan Jalur A menyentuh dinding di bagian atas tungku, distribusi tekanan diamati pada dinding tungku. (Kamata, et al. 2015)

Selain itu, distribusi tekanan juga dapat dicari dengan persamaan lain dengan persamaan ergun, seperti pada persamaan 2.1.

$$\frac{\Delta P}{H} = \psi \frac{1-\varepsilon}{\varepsilon^3} \frac{\rho}{d} w^2 \quad (2.1)$$

$$\psi = 1,75 + \frac{150}{Re'} \quad (2.2)$$

$$Re' = \frac{\rho \cdot v \cdot d}{\mu(1-\varepsilon)} \quad (2.3)$$

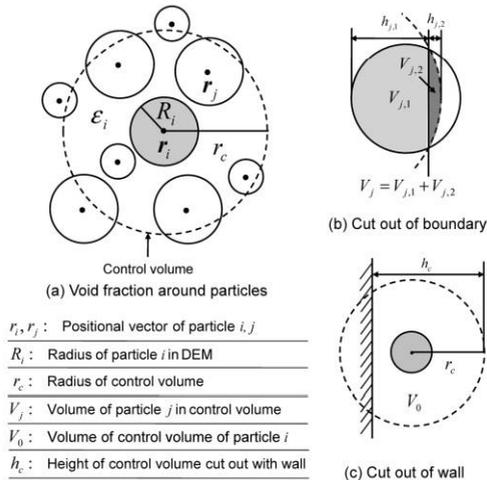
$\Delta P$  = penurunan tekanan,  $H$  = *height*,  $\varepsilon$  = *voidage factor*,  $\rho$  = densitas gas, dan  $\psi$  = *friction factor*. (Babich, 2015)

*Blast furnace* dengan susunan material berlapis merupakan gambaran kompleks dari tabung padat (packed column). Di dalamnya, aliran gas mengalami resistansi di sepanjang ketinggian tabung sehingga kehilangan sejumlah energi yang dinamakan pressure drop. Indikator ini penting dalam evaluasi proses blast furnace secara makro. (Agustin, 2017)

### 2.9.2 Distribusi Kecepatan Gas

Sebelum menentukan kecepatan gas, kita harus menentukan mencari hasil tentang berapa besar *voidage* (celah) dalam satu *cluster*, ilustrasi dapat dilihat pada Gambar 2.11. Untuk mencari hasil tersebut, maka harus dicari dengan persamaan 2.6

$$\varepsilon_i = 1 - \frac{1}{V_0} \sum_j V_j \quad (2.4)$$



**Gambar 2.14** Perhitungan *Void* disekeliling Partikel (Natsui 2011)

Distribusi aliran gas di blast furnace memiliki pengaruh besar terhadap produktivitas, bahan bakar konsumsi dan stabilitas operasionalnya (Peacey and Davenport 1979). Distribusi gas dipengaruhi oleh variasi permeabilitas lokal dari layer awal. Oleh karena itu, cara yang paling efektif untuk meningkatkan produktivitas *blast furnace* adalah mengendalikan distribusi gas radial dengan cara menyesuaikan permeabilitas. Variasi melalui urutan pengisian yang tepat. Menggunakan Navier-Stokes seperti pada persamaan 2.5 dan 2.6

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho) + \nabla(\varepsilon\rho v) = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial}{\partial t}(\varepsilon\rho v) + (v\nabla)\varepsilon\rho v = -\varepsilon\nabla p + \varepsilon\mu\nabla\cdot\nabla v + f \quad (2.6)$$

$v$  = velocity (m/s),  $\varepsilon$  = voidage,  $p$  = pressure (Pa),  $\rho_g$  = densitas gas ( $\text{kg/m}^3$ ),  $\mu_g$  = viskositas gas,  $f_g$  = gaya interaksi antara partikel dan fluida.

Banyak peneliti menggunakan persamaan ergun dalam bentuk vektorial persamaan konservasi massa (persamaan 2.7 dan 2.8) untuk mensimulasikan aliran gas melalui layer awal homogen multidimensional.

$$-\nabla p = F_1 \cdot v + F_2 \cdot |v| \cdot v \quad (2.7)$$

dimana,

$$F_1 = 150(1-\varepsilon)^2 \mu_g / (d_p)^2 \varepsilon^3 \quad (2.8)$$

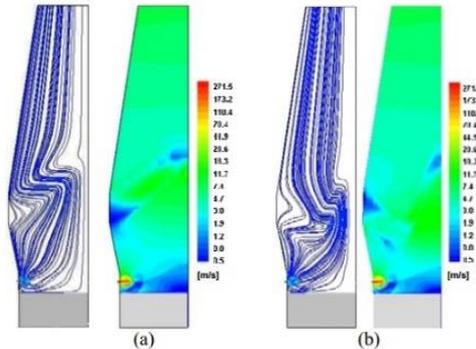
$$F_2 = 1,75(1-\varepsilon)\rho_g / (d_p)\varepsilon^3 \quad (2.9)$$

$d_p$ , merupakan diameter partikel. Beberapa penulis menggunakan model persamaan Navier-Stokes, dimana fasa antar-fase fluida digambarkan sebagai *body force* istilah menggunakan

persamaan Ergun. Lainnya [Ziolkowska dan Ziolkowski (1993); Bey dan Eigenberger (1997)] menggunakan persamaan Navier-Stokes dengan menggunakan viskositas yang efektif sebagai faktor penyesuaian menggunakan persamaan Ergun, sehingga Pengukuran mereka bisa lebih sesuai dengan modelnya. (Abhale, Viswanathan and Ballal 2009)

Meski model numerik diformulasikan untuk mengetahui gas-liquid antar partikel, struktur kemasan yang sangat tidak seragam maka efisiensi komputasi ditingkatkan dengan menghitung konvergensi kecepatan dan tekanan sebelum memindahkan permukaan bebas. Gambar 2.9 menunjukkan aliran arus gas (keluar dari *tuyere*) dan absolut kontur distribusi kecepatan. Biasanya, kecepatan tinggi masuk dari *tuyere* ini diarahkan sedikit ke atas oleh *bird-nest* dan hanya terbatas pada *raceway*. Tekanan umumnya lebih tinggi di dalam rongga, terutama di titik impak jet di dinding *raceway*. Kecepatan menurun tajam di daerah *birdnest* karena rendah permeabilitas. Kecepatannya menjadi relatif tinggi di pusat bagian dari zona aktif, dimana aliran penampang melintang berkurang dengan pembatasan sektor-sektor lain. Dengan demikian daerah ini bisa jadi dipahami sebagai satu di mana aliran gas dari berbagai *tuyer* muncul. Kecepatan gas meningkat melalui zona kohesif karena dikurangi luas penampang.

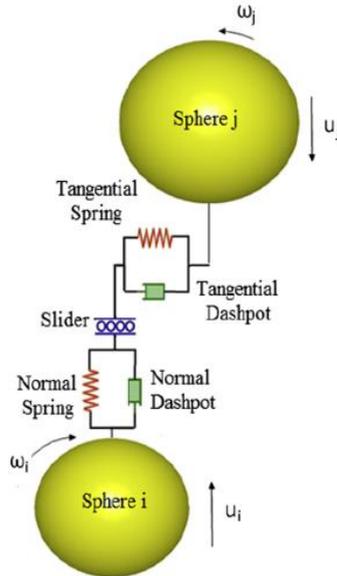
Seperti pada Gambar 2.12, ada tiga zona kecepatan rendah yang terletak di: (a) Sisi bawah zona kohesif di dekat dinding, di mana dinding secara efektif mencegah aliran gas horisontal; (b) Bagian tengah atau puncak zona kohesif, dimana aliran vertikal dicegah; dan (c) Zona central di atas permukaan cair, dimana permeabilitas rendah *deadman* terkena aliran gas. (Guo, et al. 2006)



**Gambar 2.15** (a) *Cohesive Zone* tipe V (b) tipe W  
(Guo, et al. 2006)

## 2.10 *Discrete Element Method (DEM)* dan *Solid Particle Model*

*Discrete Element Method (DEM)* merupakan metode numerik untuk menghitung dan menganalisa interaksi partikel solid dalam jumlah besar, dimana partikel-partikel tersebut melakukan pergerakan secara translasi maupun rotasi sehingga dapat dideskripsikan secara matematis menurut Hukum II Newton. Dalam DEM, model interaksi antar partikel digambarkan seperti pegas dan *dashpot* sesuai dengan sifat yang elastis dan plastis pada suatu partikel saat arah normal serta *slider*, pegas dan *dashpot* pada arah tangensial.



**Gambar 2.16** Model gaya interaksi antarpartikel  
(Yu and Saxén 2013)

Dari gambar di atas, interaksi terjadi antara partikel  $i$  dan partikel  $j$  dimana gaya kontak dan gaya redam masing-masing direpresentasikan oleh gaya pegas dan *dashpot*. Sementara itu, gaya tangensial dibatasi oleh gesekan geser (*sliding friction*) dan digambarkan dengan panel geser. Percepatan translasi dan rotasi partikel dikalkulasi dengan menjumlahkan semua gaya dan torsi yang bekerja pada partikel. Persamaan untuk suatu partikel  $i$  yang mengalami kontak dengan partikel  $j$  dapat dituliskan sebagai berikut (Yu and Saxén 2013):

$$m_i \frac{dV_i}{dt} = \sum_{j=1}^K (F_{cn,i j} + F_{dn,i j} + F_{ct,i j} + F_{dn,i j}) + m_i g \quad (2.10)$$

$$I_i \frac{d\omega_i}{dt} = \sum_{j=1}^K (T_{t,i j} + T_{r,i j}) \quad (2.11)$$

dimana  $V_i$ ,  $I_i$  dan  $\omega_i$  masing-masing merupakan kecepatan translasional, momen inersia dan kecepatan angular. Gaya yang bekerja tidak lain merupakan gaya gravitasi ( $m_i g$ ) dan gaya

antarpartikel, termasuk gaya normal ( $F_{cn, ij}$ ) dan gaya kontak tangensial ( $F_{ct, ij}$ ) serta gaya redam (*damping*) ( $F_{dn, ij}$  dan  $F_{dt, ij}$ ). Gaya antarpartikel dihitung sejumlah partikel  $K$  yang berinteraksi dengan partikel  $i$  dan tergantung pada deformasi normal

**Tabel 2.1** Gaya dan torsi dari sebuah partikel dalam analisis DEM

Gaya dan Torsi	Tipe	Simbol	Persamaan
Gaya normal	Kontak	$F_{cn, ij}$	$-k_n \delta_n^{\frac{3}{2}} n$
	Redam	$F_{dn, ij}$	$-k \eta_n V_{n, ij}$
Gaya Tangensial	Kontak	$F_{ct, ij}$	$-k_t \delta_t$
	Redam	$F_{dt, ij}$	$-k_t V_{t, ij}$
Rolling	Torsi	$T_{t, ij}$	$R_i \times (F_{ct, ij} \times F_{dt, ij})$
	Gesekan	$T_{r, ij}$	$-\mu_r  F_{cn, ij}  \omega'$
Global	Gravitasi		$m_i g$

Sumber: Yu dan Saxen, 2010

dan deformasi tangensial. Seluruh gaya dan torsi yang terlibat disusun dalam Tabel 2.4 dimana parameter variabel untuk menentukan gaya antara lain (Yu dan Saxen, 2013):

$$k_n = \frac{4}{3} \frac{\sqrt{\frac{R_i R_j}{(R_i + R_j)}}}{\frac{(1-v_i^2)}{E_i} + \frac{(1-v_j^2)}{E_j}} \quad (2.12)$$

$$n = \frac{\delta_{n, ij}}{|\delta_{n, ij}|} \quad (2.13)$$

$$V_{n, ij} = (V_{ij} \times n) \quad (2.14)$$

$$V_{t, ij} = V_{ij} - V_{n, ij} \quad (2.15)$$

$$V_{ij} = V_j - V_i + \omega_j \times R_j n - \omega_i \times R_i n \quad (2.16)$$

$$\omega' = \frac{\omega_i}{|\omega_i|} \quad (2.17)$$

$$F_{ct,ij} + F_{dt,ij} \leq \mu_s \times F_{cn,ij} \quad (2.18)$$

dimana, nilai dari  $\eta_n$ ,  $k_t$  dan  $\eta_r$  diperoleh dari literatur.  $E$  dan  $\nu$  masing-masing merupakan modulus Young dan rasio Poisson dari partikel,  $R$  dan  $G$  menunjukkan radius dan shear modulus, sedangkan  $e$ ,  $\mu_s$  dan  $\mu_r$  tidak lain adalah koefisien restitusi, gesekan statis dan gesekan rotasional. Kekerasan dari partikel dan *dashpot* masing-masing berhubungan dengan modulus Young dan koefisien restitusi, sedangkan gesekan antarpartikel dilihat dari sudut pandang Hukum Gesekan Coulomb, yang nilainya harus di bawah gesekan statis maksimum. Dalam simulasi, pergerakan setiap partikel diintegrasikan dari Persamaan (2.12) dan (2.13) menggunakan metode eksplisit dengan *time step* yang rendah dari kondisi awal yang diberikan dengan mempertimbangkan interaksi antara partikel dan permukaan (Mitra and Saxen 2015).

Kelemahan dari DEM secara konvensional terletak pada algoritma yang mengasumsikan seluruh partikel berbentuk bulat, dimana kondisi ini jauh berbeda dengan realita sehingga dapat mempengaruhi hasil analisis dengan signifikan. *Ore* dan *coal* dalam *blast furnace* selain berbeda dari segi ukuran dan sifat-sifat fisiknya, bentuknya juga berbeda. *Ore pellet* relatif bulat dan lembut, tetapi batu bara tidak beraturan sehingga partikelnya membutuhkan suatu pertimbangan khusus secara pemodelan (Mitra and Saxen 2015).

## 2.11 Computational Fluid Dynamic (CFD)

*Computational Fluid Dynamic* (CFD) merupakan cabang dari mekanika fluida yang memprediksi aliran fluida, transfer massa dan panas, reaksi kimia, dan fenomena-fenomena lain melalui penyelesaian persamaan-persamaan matematis melalui analisis numerik. CFD didasarkan pada 3 pendekatan numerik yaitu *Finite Difference Method* (FDM), *Finite Element Method* (FEM) dan *Finite Volume Method* (FVM). FDM merupakan metode lama yang mengaplikasikan sistem polinomial seperti

polinomial Legendre serta deret Fourier dan Taylor untuk memperoleh persamaan diferensial secara eksplisit (Peiro and Sherwin 2005).

Karena FDM terbatas untuk geometri-geometri sulit, model FEM dan FVM menjadi lebih populer dan banyak digunakan dalam berbagai aplikasi. Diskritisasi FEM mengambil bagian pada elemen-elemen kecil dalam domain komputasinya untuk pencarian solusi dengan pendekatan prediksi sedikit demi sedikit. Persamaan diferensial parsial yang diselesaikan biasanya diperoleh dengan menyatakan kembali persamaan konservasi dalam formulasi yang lemah dan pertama kali dikembangkan menggunakan metode Galerkin. Sedangkan FVM didasarkan pada bentuk integral dari persamaan diferensial parsial yang harus dipecahkan dengan nilai rata-rata dari variabel terkonservasi dalam dikeseluruhan volume. Persamaan diferensial parsial dituliskan dalam bentuk yang dapat diselesaikan dalam volume tertentu/terbatas (sel). Domain komputasi didiskritisasi dalam volume terbatas dan kemudian diselesaikan setiap persamaan yang mengatur volume tersebut (Ferziger and Perić 2002).

Penyelesaian masalah dalam CFD dilakukan dengan membagi geometri menjadi beberapa sel dan memecahkan sejumlah persamaan konservasi dalam sel-sel tersebut dengan kondisi batas yang telah ditetapkan. Persamaan konservasi merupakan seperangkat persamaan diferensial parsial mewakili konservasi simultan dari massa, momentum, energi panas dan spesies kimia. Hal inilah yang mengatur aliran fluida dan fenomena transport fluida dan padatan. Jika simulasi tidak melibatkan energi termal dan perubahan reaksi kimia, maka persamaan diferensial parsial untuk kedua parameter tersebut dapat diabaikan. Persamaan diferensial parsial untuk kontinuitas dan momentum dinyatakan:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \vec{v}) = S_m \quad (2.19)$$

dimana  $\rho$  merupakan rata-rata densitas fluida,  $\vec{v}$  merupakan vektor rata-rata kecepatan dalam sel fluida,  $t$  menunjukkan waktu dan  $S_m$

merupakan masa sumber/material. Persamaan kontinuitas menentukan konservasi massa. Variabel dibagian kiri masing-masing menunjukkan laju kenaikan massa dan laju aliran massa dalam elemen fluida, sedangkan dibagian kanan menunjukkan massa yang ditambahkan ke fase kontinu dari dispersi fase kedua (misalnya akibat pengupan, dll).

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} \cdot (\rho \vec{v}) + \nabla \cdot (\rho \vec{v} \vec{v}) = \nabla \cdot (\rho \vec{\tau}) - \nabla p + \rho \vec{g} + \vec{F} \quad (2.20)$$

dimana tekanan tensor  $\vec{\tau}$  didefinisikan sebagai:

$$\vec{\tau} = \mu \left[ (\nabla \vec{v} + \nabla \vec{v}^T) - \frac{2}{3} \nabla \cdot \vec{v} I \right] \quad (2.21)$$

dimana  $p$  merupakan tekanan statis,  $\vec{g}$  percepatan gravitasi,  $\vec{F}$  gaya eksternal,  $\mu$  viskositas tekanan dan  $I$  unit tensor. Persamaan momentum Navier-Stokes memenuhi Hukum II Newton. Laju perubahan momentum setara dengan jumlah gaya yang bekerja pada partikel. Nilai-nilai disebelah kiri Persamaan 2.14 merujuk pada laju peningkatan momentum partikel dan laju bersih momentum kedalam partikel sedangkan sebelah kanan mengacu pada gaya permukaan pada partikel karena tegangan *viscous*, gradien tekanan, gravitasi dan gaya luar lainnya (Adema 2014).

Aplikasi CFD populer disandingkan dengan DEM untuk pemodelan interaksi fase padat dan cair/gas. DEM mensimulasikan aliran zat padat dalam tingkatan partikel individual, sedangkan aliran fluida cair/gas dimodelkan dengan CFD pada tingkat sel komputasi. Pengintegrasian kedua metode secara numerik diperoleh dengan mekanisme sebagai berikut. DEM akan memberikan informasi seperti posisi, dan kecepatan dari suatu partikel untuk evaluasi porositas dan daya hambat fluida dalam sel komputasi. CFD kemudian akan menggunakan data ini untuk menentukan bidang aliran gas yang kemudian menghasilkan gaya hambat fluida pada partikel tersebut. Penggabungan gaya yang dihasilkan DEM melahirkan informasi mengenai gerakan suatu partikel pada langkah selanjutnya (Miao, et al. 2017).

---

### 2.11.1 Pemodelan CFD Blast Furnace

CFD untuk blast furnace dikondisikan sebagai aliran multi-fasa. Fasa-fasa umum secara umum terdiri dari gas, solid, dan liquid.

#### a. Fasa gas

Fasa ini merupakan fasa yang dominan mengalir di dalam *blast furnace* mulai dari awal operasi hingga *metal tapping*. Sesuai dengan persamaan umum transfer momentum, komponen gas terdiri dari kecepatan aliran dan viskositas berpengaruh terhadap distribusi tekanan di dalam *blast furnace*. Kedua variabel tersebut bernilai tidak konstan sesuai dengan kondisi operasi, sehingga menghasilkan perubahan tekanan atau *pressure drop*. Persamaan Ergun dan Navier-Stokes yang sebelumnya telah dijelaskan dapat mendeskripsikan fenomena ini dengan baik, dan sudah valid secara eksperimental.

#### b. Fasa solid

Secara umum, ada dua metode CFD untuk aliran fasa solid: pendekatan diskrit dan pendekatan kontinum. Pendekatan diskrit, atau umum disebut sebagai *Discrete Element Approach*, mendeskripsikan *solid flow* sebagai kumpulan partikel-partikel tunggal yang bergerak. Sehingga, data yang dihasilkan mendetail namun metode ini memiliki aplikasi yang terbatas karena perhitungan yang tidak efisien. Pendekatan kontinum mendeskripsikan *solid flow* sama seperti *gas flow*, yaitu dalam wujud kontinum. Pendekatan kontinum untuk *solid flow* dapat dibagi menjadi 2 jenis yaitu dengan *mixed burden* dan dengan *layered burden*. Kedua jenis ditentukan oleh permodelan tambahan berupa permodelan distribusi *burden* (*burden structure prediction model*). Permodelan tambahan ini berada di luar ruang lingkup CFD karena memiliki algoritma khusus namun penggunaannya menjadikan CFD semakin mendekati kondisi *blast furnace* sesungguhnya. Kedua jenis dapat menggunakan prinsip mekanika benda padat atau mekanika fluida dalam perhitungan *solid flow*.

#### c. Fasa Liquid

Aliran fasa cair yang dimodelkan berupa logam cair hasil reduksi dan *slag*. Ada beberapa model yang digunakan untuk kalkulasi *liquid flow* yaitu *potential flow*, model probabilitas, model probabilitas-kontinuitas, *tube network dynamic model*, dan *force balance model*. Metode yang paling banyak digunakan adalah *force balance model* karena kalkulasi yang efisien serta mampu merepresentasikan fenomena fisis terkait aliran fluida melalui *packed bed*. Apabila dipasangkan dengan *stochastic model*, aliran *liquid* yang menyebar di antara *packed bed* juga dapat dihitung. (Agustin 2017)

### 2.11.2 *Eulerian Multiphase*

Aliran multi-fasa di dalam MBF yang berupa fasa solid dan gas dimodelkan menggunakan *Eulerian Multiphase*. Fasa gas di atur sebagai fluida penuh, sedangkan fasa solid diatur sebagai fluida *granular* dan *packed bed*. Sehingga simulasi dilakukan dengan perintah interaksi multifasa antara gas dan solid. Persamaan konservasi (ANSYS Inc., 2013) diselesaikan untuk masing-masing fasa dengan formula sebagai berikut:

$$\frac{1}{\rho_{rq}} \left[ \frac{d}{dt} (\alpha_q \rho_q) + \nabla \cdot (\alpha_q \rho_q v_q) \right] = \sum_{p=1}^n (\dot{m}_{pq} - \dot{m}_{qp}) \quad (2.22)$$

$$\frac{d}{dt} (\alpha_l \rho_l v_l) + \nabla \cdot (\alpha_l \rho_l v_l v_l) = -\alpha_l \nabla_p + \nabla_{\tau l} + \alpha_l \rho_l g + (F_l + F_{lift,l} + F_{wl,l} + F_{vm,l} + F_{td,l}) + \sum_{i=1}^N (K_{ls} (v_l - v_s) + \dot{m}_{ls} v_{ls} - \dot{m}_{sl} v_{sl}) \quad (2.23)$$

$$\frac{d}{dt} (\alpha_s \rho_s v_s) + \nabla \cdot (\alpha_s \rho_s v_s v_s) = -\alpha_s \nabla_p + \nabla_{\tau s} + \alpha_s \rho_s g + (F_s + F_{lift,s} + F_{wl,s} + F_{vm,s} + F_{td,s}) + \sum_{l=1}^N (K_{ls} (v_l - v_s) + \dot{m}_{ls} v_{ls} - \dot{m}_{sl} v_{sl}) \quad (2.24)$$

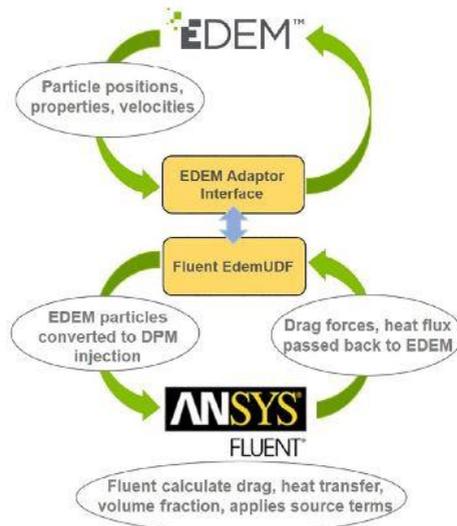
Persamaan 2.22 adalah persamaan kontinuitas. Persamaan 2.23 dan 2.24 adalah persamaan momentum untuk tiap-tiap fasa yang diturunkan dari persamaan umum. Dengan:  $l$  : fasa fluida,  $s$  : fasa solid,  $K_{ls}$  : *interaction force* antara fasa fluid dan solid,  $\dot{m}_{ls}$  dan  $\dot{m}_{sl}$  : transfer massa antara fasa fluid dan solid  $v_l$  dan  $v_s$  : kecepatan fasa tunggal fluid dan solid,  $v_{ls}$  dan  $v_{sl}$  : kecepatan

antara fasa fluid dan solid,  $F_{lift}$  : Gaya angkat,  $F_{wl}$  : Gaya dinding,  $F_{vm}$  : Gaya *virtual mass*  $F_{td}$  : Gaya turbulen. (Ansys, 2013).

## 2.12 DEM-CFD Coupled

Di partikel yang bersifat alami jarang beroperasi dalam sistem yang bebas fluida, maka ada kebutuhan untuk metodologi simulasi yang dapat menangkap kedua mekanisme padat dan fluida serta interaksi antara keduanya. Para peneliti telah berupaya menggabungkan teknik CFD dengan metode partikel Newton yang digunakan dalam DEM (Sousani, et al. 2019).

Pendekatan CFD-DEM pertama kali diusulkan oleh Tsuji et al. untuk studi tentang *slug-flow pneumatic conveying* pada tahun 1992 dan fluidisasi pada tahun 1993, dan kemudian diikuti oleh banyak lainnya. Pendekatan ini, setelah dirasionalisasi oleh Xu dan Yu, telah diterima secara luas sebagai alat yang efektif untuk mempelajari sistem cairan-partikel. (Kuang, Zhou and Yu 2019)



**Gambar 2.17** Skema DEM-CFD *coupled*.  
(Kuang, Zhou and Yu 2019)

### 2.13 Penelitian Sebelumnya

Pada Tabel 2.1 merupakan daftar kumpulan penelitian dengan topik pemodelan *mini blast furnace* dengan menggunakan *CFD-DEM coupled* yang dapat menunjang penelitian kali ini.

**Tabel 2.2** Penelitian Sebelumnya

No	Penulis	Tahun	Penelitian
1	Wright <i>et al</i>	2011	Zona stagnan dipengaruhi secara signifikan oleh laju aliran gas dalam model 2D tetapi tidak dalam 3D.
2	Shen <i>et al</i>	2012	Kondisi operasi memainkan peran terbatas dalam meningkatkan titik api pada ujung raceway tetapi dominan pada daerah resirkulasi di permukaan raceway.
3	Fu <i>et al</i>	2017	Strategi simulasi baru untuk memahami proses keseluruhan dalam blast furnace dilakukan dengan mengintegrasikan model <i>tuyere</i> , <i>raceway</i> dan <i>shaft</i> .
4	Miao <i>et al</i>	2017	Terdapat 3 jenis raceway yaitu sirkulasi raceway searah jarum jam (terbentuk ketika kecepatan gas sedang), berlawanan jarum jam (kecepatan gas rendah) dan seperti asap. Mekanisme pembentukan raceway ini berhubungan dengan sirkulasi pusaran gas di atas dan di luar <i>tuyere</i> .
7	Ghfoer	2018	Pengaruh laju aliran udara mengakibatkan perubahan <i>Voidage</i> pada <i>bed</i> , dengan perubahan paling stabil pada variasi 0.05 m <sup>3</sup> /s. Kecepatan gas meningkat seiring peningkatan laju aliran udara, dengan kecepatan pada <i>central area</i> tertinggi terletak pada ketinggian

---

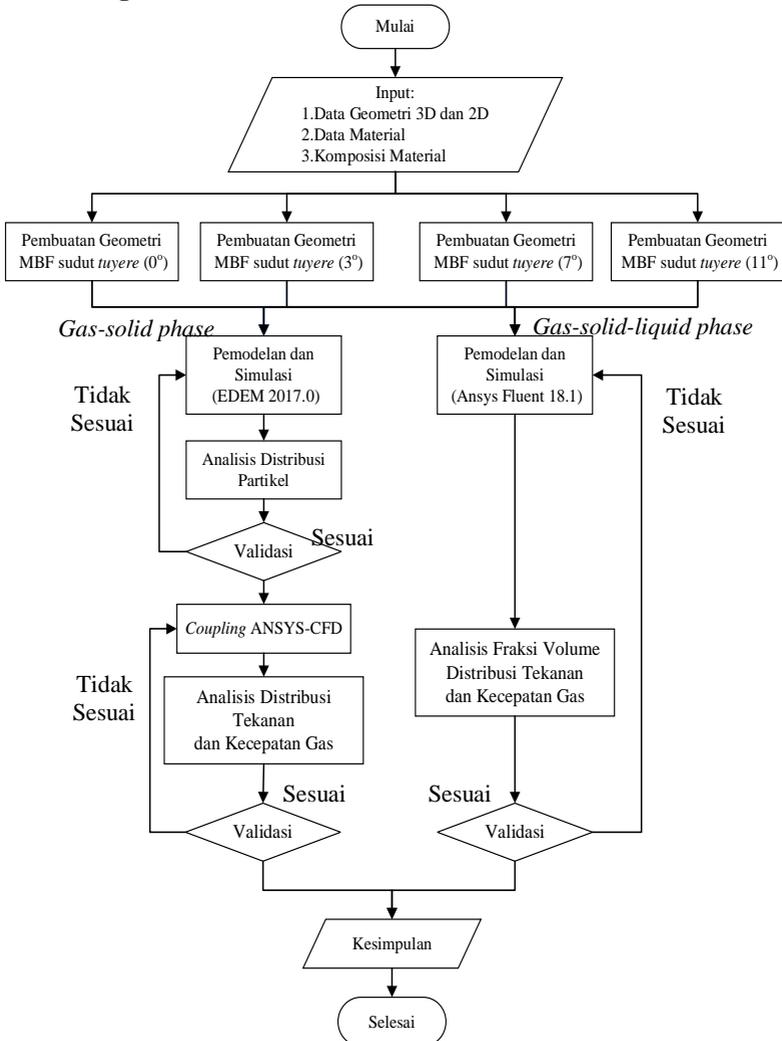
5	Kurniawan	2019	<p>35-45cm (<i>tuyere level</i>). Tekanan gas meningkat terhadap peningkatan laju aliran udara, dengan tekanan tertinggi berada pada area <i>raceway</i>. Dari hasil pemodelan menunjukkan pengaruh peningkatan sudut <i>tuyere</i> mengakibatkan pengoptimalan pembentukan voidage pada bed di variasi sudut <i>tuyere</i> 11°.Kecepatan gas meningkat seiring peningkatan sudut <i>tuyere</i>, dengan kecepatan pada <i>central area</i> tertinggi terletak pada ketinggian 35-45cm (<i>tuyere level</i>). Tekanan gas meningkat terhadap peningkatan sudut <i>tuyere</i>, dengan <i>pressure drop</i> paling rendah pada variasi sudut <i>tuyere</i> 3°</p>
---	-----------	------	--

---

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

# BAB III METODOLOGI PENELITIAN

## 3.1 Diagram Alir Penelitian



**Gambar 3.1** Diagram alir penelitian

---

## 3.2 Prosedur Penelitian

### 3.2.1 *Gas-Solid Phase*

Simulasi dalam penelitian ini dilakukan mengikuti tahapan-tahapan sistematis sebagai berikut:

1. Pengumpulan data input, yang meliputi karakteristik fisik dan mekanik batu bara, baja penyusun furnace, *refractory*, *limestone* dan bijih nikel laterit yang telah dilakukan *conditioning*, dimensi *mini blast furnace*, input analisis fluida, dan variasi sudut tuyere.
2. Pembuatan geometri *mini blast furnace* 3D menggunakan *Solidworks* 2018.
3. Pengaturan *boundary condition*
4. Simulasi distribusi burden material/partikel dalam MBF menggunakan DEM (solid particle model) untuk geometri *tuyere* 3 dimensi
5. *Coupling Discrete Element Method* dan *Computational Fluid Dynamics*
6. Simulasi distribusi kecepatan gas dan tekanan di dalam MBF
7. Menganalisa hasil pemodelan dan menentukan variabel sudut *tuyere* yang optimal.

### 3.2.2 *Gas-Solid-Liquid Phase*

Simulasi dalam penelitian ini dilakukan mengikuti tahapan-tahapan sistematis sebagai berikut:

1. Pengumpulan data input, yang meliputi karakteristik fisik dan mekanik batu bara, baja penyusun furnace, *refractory*, *limestone* dan lelehan logam nikel yang telah dilakukan *conditioning*, dimensi *mini blast furnace*, input analisis fluida, dan variasi sudut *tuyere*.
  2. Pembuatan geometri *mini blast furnace* 2D menggunakan *ANSYS Design-modeler*.
  3. Pengaturan *boundary condition* dan *mesh* geometri
  4. Simulasi menggunakan *ANSYS Fluent* 18.1
-

5. Memasukkan parameter fasa, kecepatan gas, dan *multiphase model*
6. Memasukkan *solution initialization* pada *fluent*
7. Simulasi distribusi kecepatan gas dan tekanan di dalam MBF
8. Menganalisa hasil pemodelan dan menentukan variabel sudut *tuyere* yang optimal.

### 3.3 Sifat Fisik dan Mekanik Mineral

Dalam penelitian ini terdapat tiga material yang digunakan, yaitu *coal*, *steel* dan *refractory*. *Coal* (batu bara) merupakan material dari *burden materials* yang dijatuhkan melalui *charging system*. *Steel* merupakan bahan penyusun *bell* dan dinding bagian luar *bell*. Sedangkan *refractory* merupakan bahan penyusun dinding bagian dalam pada MBF. *Properties* dari material menjadi hal yang krusial karena merupakan data input *software* pemodelan dari EDEM yang akan mempengaruhi keakuratan dari hasil yang didapat. Sifat fisik dan mekanik yang perlu diketahui dalam penelitian ini yaitu densitas, *poisson's ratio*, modulus young, *restitution coefficient*, *static friction coefficient* dan *rolling friction coefficient*. Tabel 3.1 menunjukkan sifat fisik dan mekanik dari material input. Nilai densitas diperoleh dari eksperimen. Sedangkan untuk yang lain diperoleh dari studi literatur (Mitra, 2015 ; Teffo, 2013 ; Shen, 2013)).

**Tabel 3.1** Sifat fisik dan mekanik material input aplikasi EDEM

Material	Parameter	Nilai
Coal	Densitas	1307.18 Kg/m <sup>3</sup>
	<i>Poissin's Ratio</i>	0.24
	<i>Modulus Young</i>	18.2 Mpa
	<i>Restitution Coefficient</i>	Coal 0.15 Steel 0.60 Refractory 0.25 Coal 0.20

	<i>Static Friction</i>	<i>Steel</i>	0.45
	<i>Coefficient</i>	<i>Refractory</i>	0.70
	<i>Rolling</i>	<i>Coal</i>	0.20
	<i>Friction</i>	<i>Steel</i>	0.15
	<i>Coefficient</i>	<i>Refractory</i>	0.25
<i>Steel</i>	Densitas		7870 Kg/m <sup>3</sup>
	<i>Poissin's Ratio</i>		0.29
	<i>Modulus Young</i>		77 Gpa
<i>Refractory</i>	Densitas		3100 Kg/m <sup>3</sup>
	<i>Poissin's Ratio</i>		0.15
	<i>Modulus Young</i>		314 Gpa

Kemudian, untuk mengetahui fasa *liquid* dan *solid* dibutuhkan sifat fisik dan mekanik material yang dijelaskan dalam Tabel 3.2 berikut:

**Tabel 3.2** Sifat fisik dan mekanik pada *fluent*

Material	Parameter	Nilai
Udara	Densitas	1.225 Kg/m <sup>3</sup>
	Viskositas	0.00001 Pa.s
<i>Molten Metal</i>	Densitas	7810 Kg/m <sup>3</sup>
	Viskositas	0.005 Pa.s
<i>Coal</i>	Densitas	1307.18 Kg/m <sup>3</sup>
	Viskositas	0.5 Pa.s
Laterit	Densitas	2088 Kg/m <sup>3</sup>
	Viskositas	1 Pa.s
Dolomit	Densitas	1708.97 Kg/m <sup>3</sup>

Viskositas

0.5 Pa.s

### 3.4 Data Input Analisa Fluida

#### 3.4.1 *Gas-Solid Phase*

Pada penelitian ini, analisis fluida menggunakan *fluent* di *compile* dengan hasil analisis dari *EDEM* menggunakan *EDEM Coupling Journal*. Selanjutnya, *fluent* di *setting* seperti Tabel 3.3 berikut:

**Tabel 3.3** Model dan *solution setup coupling* CFD-DEM

Pengaturan	Perintah
Tipe Simulasi	<i>Transient 3D, EDEM Coupled Double Precision; Pressure-Based;</i>
Kondisi Solver	<i>Gravity-on; Discrete Phase On</i>
<i>Multiphase Model</i>	<i>Eulerian Multiphase Model</i>
<i>Turbulence Model</i>	<i>K-Omega Mixture Model</i>
<i>Drag Parameter</i>	<i>Gidaspow</i>
Kondisi <i>inlet</i>	<i>Phase-1; Velocity Inlet (Tabel 3.4 dan Tabel 3.5)</i>
	<i>Edem Phase</i>
Kondisi <i>outlet</i>	<i>Pressure Outlet, top pressure 1 atm</i>
Kondisi <i>wall</i>	<i>No-Slip Condition</i>

Data *input* material untuk analisis fluida dengan metode FEM berupa properti termal. Data-data tersebut terangkum dalam Tabel 3.4 berikut ini:

**Tabel 3.4** Properti Input  
([engineeringtoolbox.com](http://engineeringtoolbox.com))

Material	Parameter	Nilai
<i>Coal</i>	Konduktivitas	0.2

---

	Termal (W/m.K)	
	Panas Spesifik (J/Kg.K)	1380
<i>Steel</i>	Konduktivitas Termal (W/m.K)	54
	Panas Spesifik (J/Kg.K)	490
	Konduktivitas Termal (W/m.K)	0.15
<i>Refractory</i>	Panas Spesifik (J/Kg.K)	850
	Densitas (Kg/m <sup>3</sup> )	1.225
	Viskositas (Kg/m-s)	1006.43
Udara	Konduktivitas Termal (W/m.K)	0.0242
	Panas Spesifik (J/Kg.K)	1.7894e-05

---

### 3.4.2 *Gas-Solid-Liquid Phase*

Pada penelitian ini, analisis fluida menggunakan *fluent* untuk mengetahui fenomena yang terjadi pada fasa liquid dan solid. Selanjutnya, mengatur *fluent* seperti pada tabel 3.5 berikut :

**Tabel 3.5** Model dan *solution setup fluent*

Pengaturan	Perintah
Tipe Simulasi	<i>Transient 2D</i>
Kondisi <i>Solver</i>	<i>Double Precision; Pressure-Based; Gravity-on; Discrete Phase Off</i>
<i>Multiphase</i> Model	<i>Eulerian Multiphase Model</i>
<i>Turbulence</i> Model	<i>K-Omega Standard Model</i>
Kondisi <i>inlet</i>	<i>Gas Phase; Velocity Inlet (15.924 m/s) Liquid Phase; Velocity Inlet (0.7 m/s)</i>
Kondisi <i>outlet</i>	<i>Pressure Outlet, top pressure 1 atm</i>
Kondisi <i>wall</i>	<i>No-Slip Condition</i>

### 3.5 Data Dimensi dan Operasional *Mini Blast Furnace*

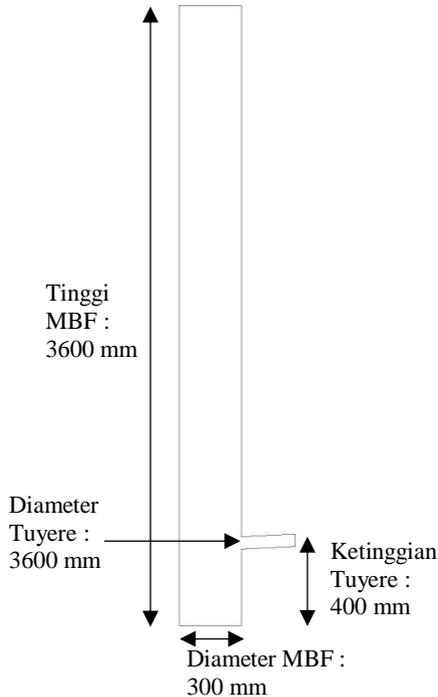
#### 3.5.1 Data Dimensi *Mini Blast Furnace*

Geometri MBF seperti Gambar 3.2 dan 3.3 yang digunakan dalam penelitian ini didapatkan berdasar data empirik (pengukuran langsung) dengan volume kerja sebesar 1.017 m<sup>3</sup> kapasitas 10 ton *conditioned ore*/hari yang sedang dikembangkan oleh Laboratorium Pengolahan Material, Departemen Teknik Material, ITS. MBF berbentuk silinder vertikal dengan dilengkapi tambahan *charging system* pada bagian atas dengan spesifikasi sebagai berikut:

1. Tinggi Luar MBF : 3700 mm
2. Tinggi Dalam MBF : 3600 mm
3. Diameter dalam : 600 mm
5. Tebal refraktori : 100 mm
6. Jumlah *tuyere* (d = 60mm) : 10 buah
7. Ketinggian *tuyere* (d= 60mm) : 400 mm

Pembuatan model menggunakan *Software SolidWork*

menghasilkan bentuk geometri seperti di halaman selanjutnya:



**Gambar 3.2** Pemodelan geometri *mini blast furnace* 2D

### 3.5.2 Data Operasional Proses *Charging Burden Material*

Dalam pengoperasiannya, susunan *burden materials* di dalam MBF dibagi menjadi tiga bagian yang diurut dari bagian terbawah, yaitu *bed* batu bara, 20 layer *burden materials*, 1 layer *burden materials* terdiri dari batu bara pada lapisan paling bawah, *conditioned ore* pada lapisan tengah dan dolomit pada lapisan paling atas.

Namun pada penelitian ini lebih difokuskan pada bagian *bed* yang berisi *Coal* dengan massa 122 Kg. Spesifikasi massa *burden materials* pada proses *charging* untuk bagian MBF

ditampilkan pada Tabel 3.6

**Tabel 3.6** Massa *charging* untuk Mini Blast Furnace

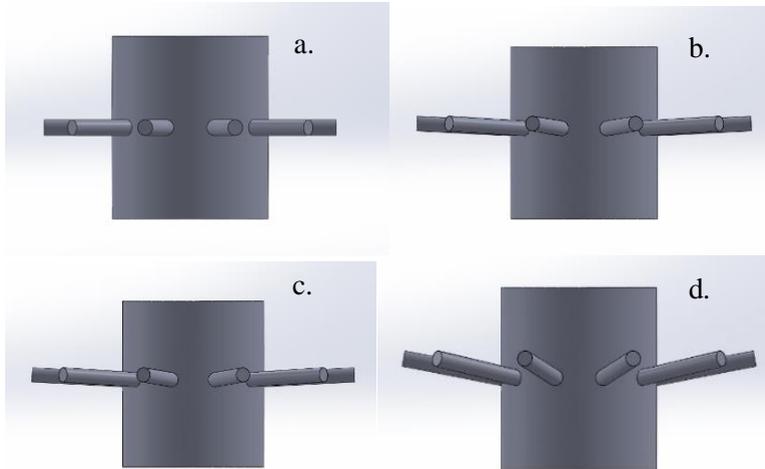
NO	Bagian Burden Materials	Jenis Burden Materials	Massa (kg)
1	Bed*	<i>Coal</i>	122
		<i>Coal</i>	17
2	Layer	<i>Conditioned Ore</i>	25
		<i>Dolomite</i>	21
3	Penutup Layer	<i>Coal</i>	17

### 3.5.3 Variasi Data

Pada penelitian kali ini, variable sudut tuyere yang digunakan adalah sebagai berikut

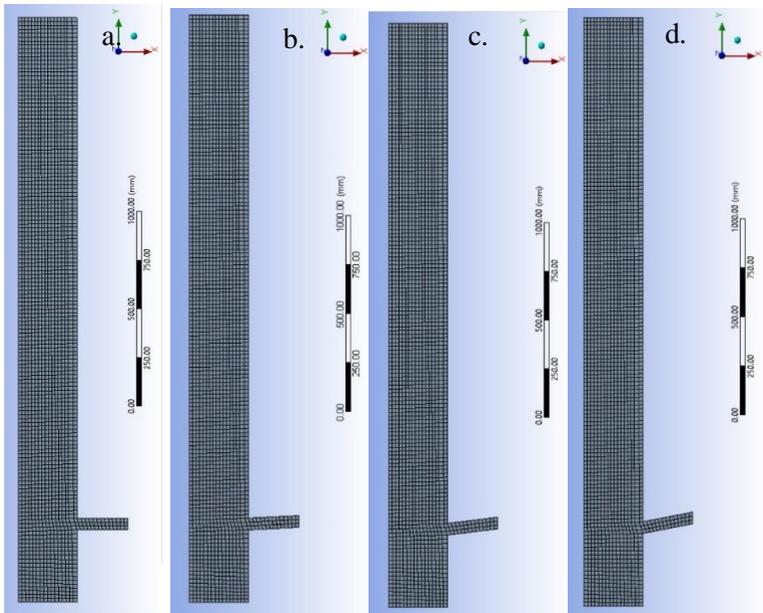
**Tabel 3.7** Variasi sudut tuyere

Sudut Tuyere	Diameter Tuyere (m)	Laju udara tuyere (m/s)
0°	0.06	15,924
3°		
7°		
11°		

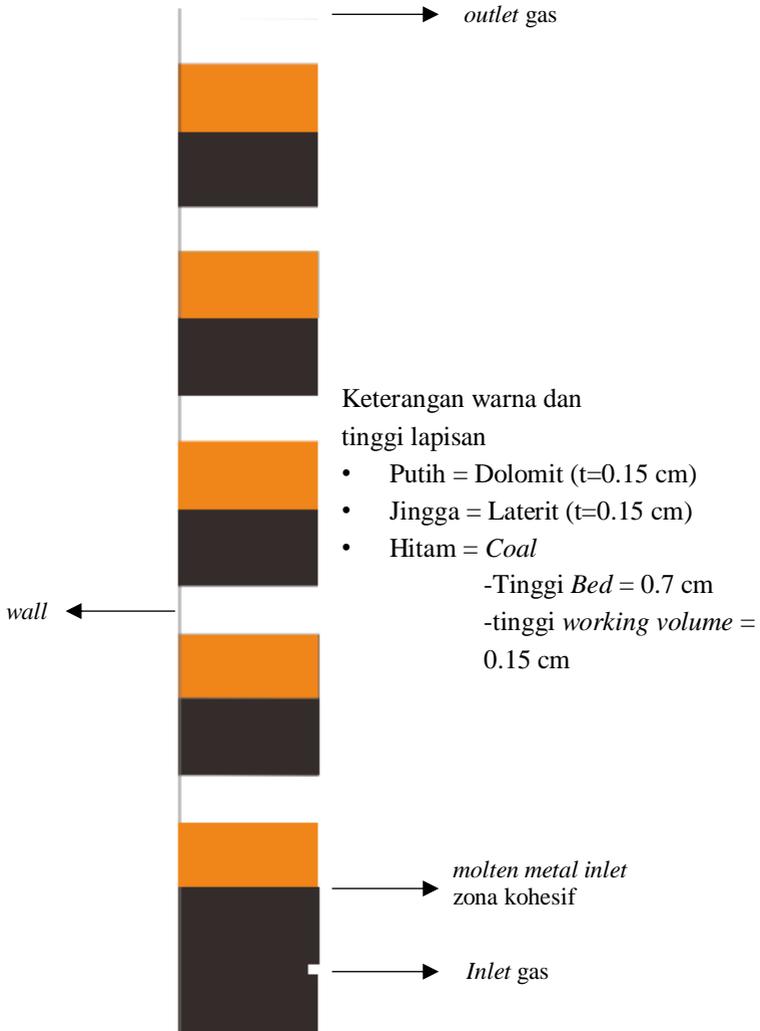


**Gambar 3.3** Geometri 3D variasi sudut *tuyere* (a.)  $0^\circ$ , (b.)  $3^\circ$ , (c.)  $7^\circ$ , dan (d.)  $11^\circ$

Pemakaian geometri 2 dimensi menggunakan *full scale* MBF, diameternya setengah dari diameter aslinya dan menggunakan satu *tuyere*. Pemodelan ini berguna untuk mengetahui fenomena multifasa berupa *gas-solid-liquid* pada MBF dikarenakan untuk mencapai hasil ekstraksi yang optimum pada simulasi sehingga mengalami hasil secara pendekatan pada penelitian secara nyata. *Meshing* yang digunakan ialah *structured mesh* dengan ukuran unit mesh 20 mm.



**Gambar 3.4** Geometri *meshing* 2D pada variasi sudut *tuyere* (a.)  $0^\circ$ , (b.)  $3^\circ$ , (c.)  $7^\circ$ , dan (d.)  $11^\circ$



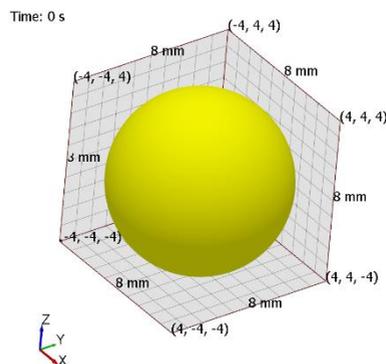
**Gambar 3.5** *Boundary Condition* pada Geometri 2D MBF

### 3.6 Data Spesifik *Burden Material*

Terdapat material utama sebagai salah satu *input material* dalam pengolahan nikel laterit dengan menggunakan MBF, yaitu *Coal*. Pada kondisi setelah proses pemanasan awal, coal akan mengalami reduksi volum. Hal ini disesuaikan dengan penggunaan *Coke* dimana pada bed setelah terjadi pemanasan awal mengalami reduksi ukuran diameter dari 24 mm menjadi kurang dari 10 mm (Chaigneau 2009). Dengan *Coal* setelah mengalami proses pembakaran awal maka, akan mengalami reduksi yang lebih signifikan, diakerenakan kandungan karbon yang lebih sedikit, sehingga ukuran dianggap homogen dengan memiliki bentuk yaitu berupa bola dengan diameter 0.8 cm. Pemodelan *Burden Material* menggunakan *software EDEM 2017.3* ditunjukkan oleh Gambar 3.4.

Bentuk partikel dimodelkan dengan satu partikel kecil (partikel aktual) yang berbentuk bola menjadi bentuk serupa partikel asli (partikel *Cluster*) dari *coal*, hal ini penulis sesuaikan dengan penelitian yang dilakukan Natsui dkk.

Sehingga untuk memodelkan *coal* berukuran 0.8 cm dibutuhkan satu partikel aktual yang memiliki diameter sama yaitu 0.8 cm.



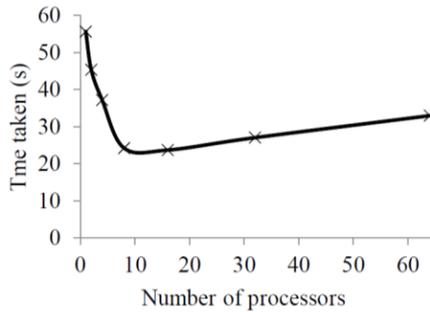
**Gambar 3.6** Bentuk *burden material Coal* (d:0.8 cm)

---

### 3.7 Pemodelan DEM dengan EDEM 2017

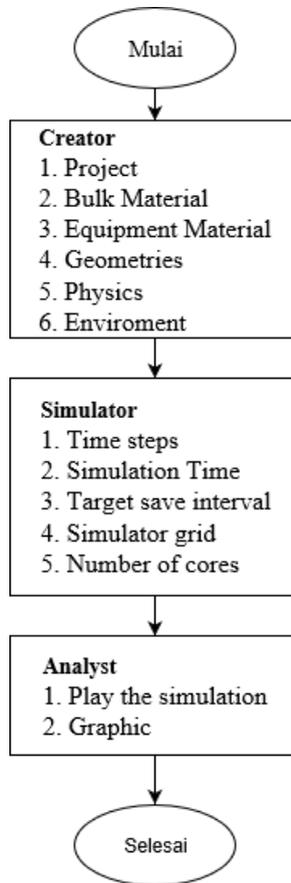
*Software Solid Particle Model* merupakan salah satu *software* yang menggunakan metode *Discrete Element Method*. *Software* ini memiliki tiga elemen utama, yaitu *creator*, *simulator* dan *analyst*. *Creator* berfungsi untuk mengatur model atau memasukkan data yang diperlukan. Input *properties* yang diperlukan adalah sifat fisik dan mekanik partikel dan equipment, geometri, bentuk dan ukuran partikel, jenis kontak partikel dan besar gravitasi. *Simulator* berfungsi untuk mengatur jalannya proses simulasi, yang meliputi *time step*, waktu simulasi, interval penyimpanan data, besar *grid* dan jumlah *processor* yang digunakan.

Penggunaan *Time step* yang sangatlah kecil dalam proses. Apabil penggunaan *time step* terlalu besar, kecepatan transfer energi menjadi sangat besar yang kemudian akan menghasilkan *unphysical deformation*, sehingga memicu terjadinya *energy generation*. *Time step* untuk perhitungan gaya dibatasi oleh waktu yang dibutuhkan untuk menyebarkan energi melalui partikel-partikel yang ada dengan gelombang, biasa disebut sebagai gelombang Rayleigh. Batasan *time step* tersebut disebut sebagai Rayleigh *time step*. Besar *time step* yang direkomendasikan adalah 10-30 % Rayleigh *time step* (Mitra 2016). Pada penelitian ini, *time step* yang digunakan yaitu 30% Rayleigh *time step* (0,00018392 sekon). Sedangkan besar *grid* (partikel terkecil) yang digunakan adalah 3 R min. Jumlah *processor* yang digunakan akan mempengaruhi kecepatan proses simulasi, seperti yang ditunjukkan pada Gambar 3.4.



**Gambar 3.7** Pengaruh jumlah *processor* terhadap waktu yang dibutuhkan dalam proses simulasi

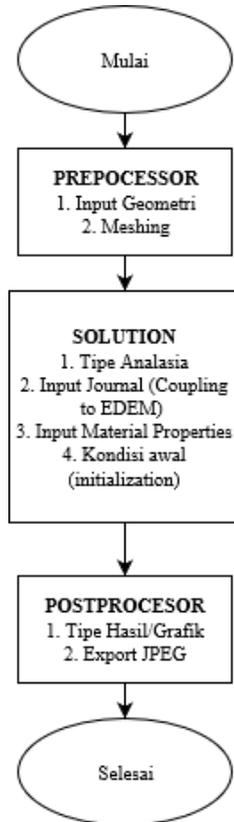
Semakin besar jumlah *processor* yang digunakan akan mempercepat waktu yang dibutuhkan dalam proses simulasi. Dalam penelitian ini, jumlah *processor* yang digunakan menyesuaikan dengan spesifikasi komputer yang digunakan. Apabila proses simulasi telah selesai, hasil dapat dilihat pada *analyst*. Pada bagian ini, peneliti ditunjang untuk memperoleh informasi tambahan dengan tersedianya grafik terhadap masalah yang dianalisis.



**Gambar 3.8** Diagram alir pemodelan *solid particle model* software EDEM 2017.0

### 3.8 Simulasi Pada Ansys-Fluent (CFD)

Distribusi *burden material* pada *software* EDEM, selanjutnya di *coupling* menuju ke Ansys-Fluent untuk menganalisis distribusi tekanan dan kecepatan gas. Langkah-langkah dalam mensimulasikan pada Ansys sesuai dengan Gambar 3.5.



**Gambar 3.9** Diagram alir pemodelan CFD software Ansys Fluent  
17.1

Berdasarkan pada Gambar 3.8, langkah simulasi kerja pada ANSYS 18.1 meliputi 3 *step* yaitu *Preprocessor*, *Solution*, dan *Postprocessor*. Pada tahap *Preprocessor* dilakukan impor Geometri Mini Blast Furnace yang sebelumnya telah dibuat dengan *software SolidWork*. Pada tahap ini ditentukan tipe elemen, material properties, ukuran *meshing* yang digunakan pada pemodelan *Mini Blast Furnace*. Selanjutnya, dilakukan proses *Solution* dengan pertama melakukan *Coupling Model* antara *software* Ansys-EDEM. Pada *software* Ansys-Fluent dimasukkan input nilai dalam suatu proses.

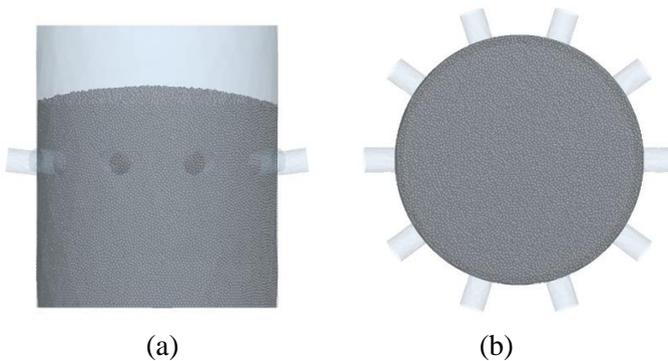
Pada pemodelan *gas-solid-liquid phase*, meliputi 3 *step* yaitu *Preprocessor*, *Solution*, dan *Postprocessor*. Pada tahap *Preprocessor* dilakukan pembuatan geometri *Mini Blast Furnace* menggunakan *Design-Modeler*. kemudian menentukan tipe elemen, material properties, ukuran *meshing* yang digunakan pada pemodelan *Mini Blast Furnace*. Selanjutnya, dilakukan proses *Solution* pada ANSYS *Fluent* 18.1.

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Pemodelan Awal

Pemodelan ini berfokus pada interaksi antar fasa (multifasa) yaitu *gas-solid* dan *gas-solid-liquid*. Sehingga bertujuan untuk mendapatkan hasil yang lebih mendekati secara nyata pada proses ekstraksi nikel dengan MBF. Pemodelan *gas-solid phase* menggunakan DEM-CFD *coupled model*, sedangkan *gas-solid-liquid phase* menggunakan Ansys CFD *Fluent*.

Pemodelan awal pada EDEM dilakukan dengan memasukkan data sifat mekanik partikel dan *boundary condition* pada aplikasi EDEM 2017.2, kemudian melakukan proses *simulation* terhadap *burden material* menggunakan perangkat lunak EDEM 2017.2 dengan menginput partikel tersebut ke dalam MBF sehingga membentuk *bed* pada MBF. Kemudian mendapatkan hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4.1 dimana *coal* yang terdistribusi ditunjukkan sebagai warna abu-abu.



**Gambar 4.1** Hasil simulasi *bed* MBF (a) tampak samping, (b) tampak atas

Simulasi ini menggunakan massa *coal* sebesar 122 kg dan mengukur ketinggian bed awal secara manual dengan metode grid (71 *grid* :710 mm) pada perangkat lunak EDEM 2017.2 dimana

didapatkan ketinggian *bed* sebesar 54 cm (10 cm di atas *tuyere*). Faktor-faktor yang mempengaruhi hasil *bed* tersebut adalah data *input* sifat mekanik partikel atau *burden material*, dan ukuran *burden material*. Sehingga hasil *bed* akan digunakan pada proses *coupling* berikutnya.

Time: 0 s



**Gambar 4.2** Ketinggian *bed* dengan massa *coal* 122 kg

#### 4.2 Pengaruh Variasi Sudut *Tuyere* terhadap *Gas-Solid Phase*

Proses setelah dari pemodelan awal adalah DEM-CFD *couple model* (*gas-solid phase*) dan Ansys CFD *Fluent* (*gas-liquid phase*). Proses ini mempunyai tujuan untuk mengetahui dan menganalisis pengaruh berupa kecepatan sudut dan tekanan yang diberikan dari *fluent*, kemudian memastikan sudut yang paling optimal untuk digunakan pada MBF.

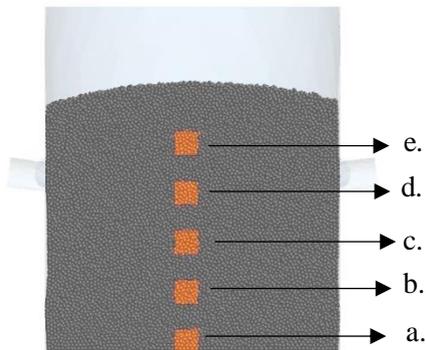
Secara umum, model diskrit dan kontinum adalah dua pendekatan utama untuk memodelkan *bed* pada *blast furnace*. *Discrete Element Method* (DEM) diterapkan untuk menggambarkan setiap *ore* dan partikel *coal* dari *burden layered*. Dengan *coupling* dengan CFD yang menggambarkan fase gas,

simulasi tersebut dapat mengungkapkan detail dari perilaku gas dan partikel yang diolah prosesnya (Fu, et al. 2014).

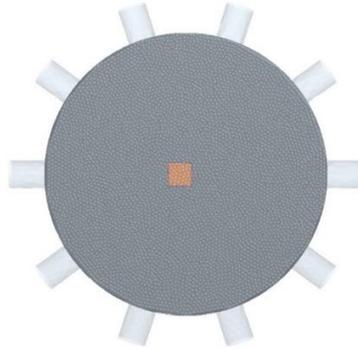
#### 4.2.1 Profil Distribusi Voidage

*Voidage* pada *coal* merupakan salah satu faktor yang *vital* dalam menentukan fenomena secara fisik di dalam MBF ukuran *coal* memiliki diameter yang lebih besar dibanding *ore* sehingga *voidage* (rongga antara *coal*) akan lebih besar menyebabkan gas mengalir lebih banyak ke daerah *voidage* besar tersebut (Rizki F 2017). Pada penelitian ini, ukuran *coal* dianggap homogen (0.8 cm) sehingga faktor konsumsi karbon pun diabaikan.

Setelah melakukan proses *coupling*, kemudian melakukan perhitungan *voidage* dengan menggunakan perangkat lunak EDEM 2017.2. Daerah yang dihitung ialah pada *central area* dimana merupakan daerah *bed* paling statis yang memiliki *voidage* berukuran kecil. Perhitungan ini menggunakan metode *grin bin group* (50mm x 50 mm x 50 mm) terhadap 5 titik yang disesuaikan pada Gambar 4.3 dan 4.4.

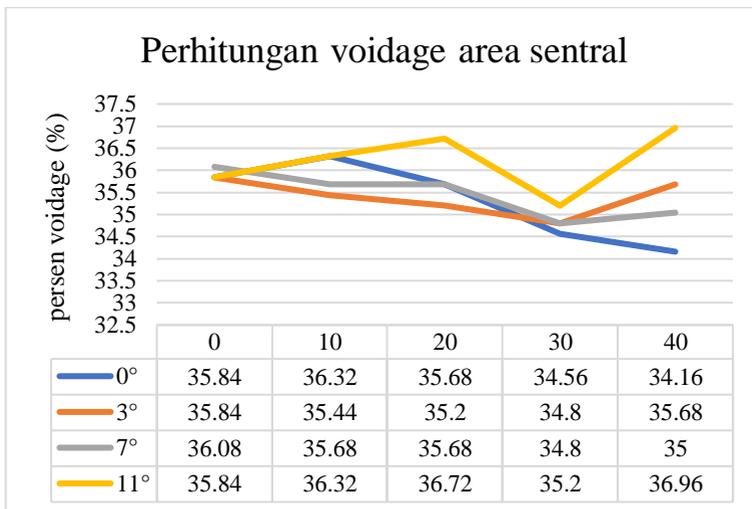


**Gambar 4.3** Plot perhitungan *voidage* di dasar MBF (a), 10 cm dari dasar (b), 20 cm dari dasar (c), 30 cm dari dasar (d), dan 40 cm dari dasar (e).



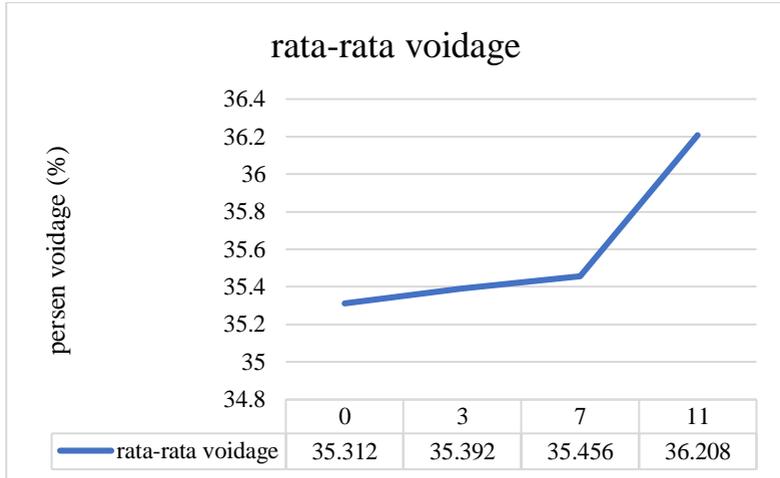
**Gambar 4.4** Plot perhitungan *voidage* tampak atas

Setelah melakukan perhitungan, kemudian membuat grafik setiap pengaruh variasi sudut *tuyere* terhadap profil *voidage* pada MBF dengan menggunakan *Microsoft Excel* sehingga didapatkan perbedaan hasil pada setiap variasi tersebut dimana.



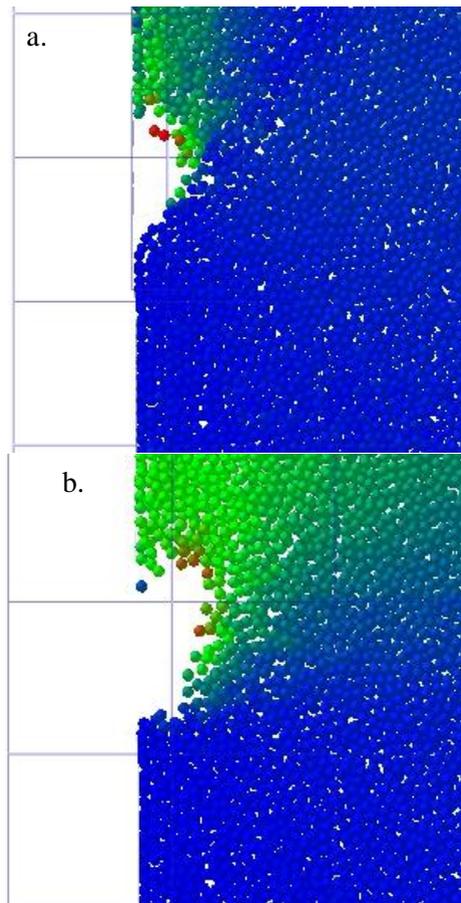
**Gambar 4.5** Grafik perhitungan *voidage* setiap variasi sudut *tuyere* terhadap *grid bin group*.

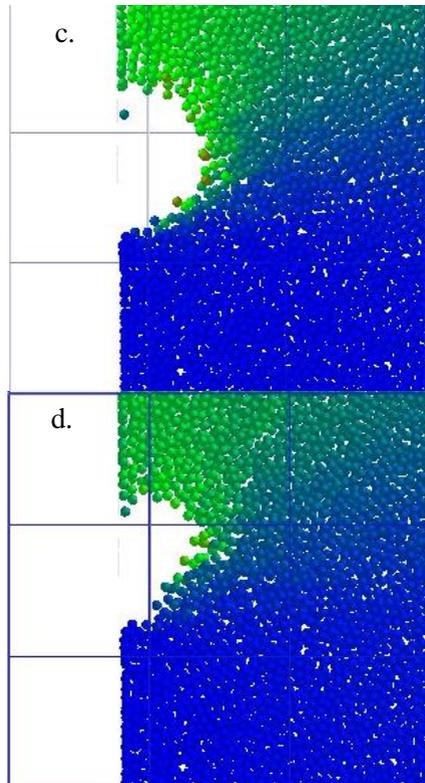
Dari hasil grafik yang ditunjukkan Gambar 4.5 tersebut, diperoleh perubahan *voidage* pada setiap grid dan terdapat hasil yang berbeda pada setiap variasi sudut *tuyere*. Terdapat penurunan nilai *voidage* pada dasar MBF hingga 20 cm dari dasar MBF untuk variasi sudut  $0^\circ$ ,  $3^\circ$ , dan  $7^\circ$  *tuyere*. Sedangkan pada variasi sudut  $11^\circ$  *tuyere* mengalami peningkatan pada dasar MBF hingga 20 cm dari dasar MBF. Hal ini dikarenakan laju partikel *coal* meningkat pada area sentral dengan meningkatnya besar sudut *tuyere*, sehingga menyebabkan *voidage* menjadi lebih besar dan mengarah ke area sentral (Umekage, et al. 2007). Kemudian, nilai *voidage* juga semakin menurun pada area *grid* 20 cm dari dasar hingga 30 cm dari dasar MBF dikarenakan memakai 10 *tuyere* dalam satu layer sehingga menghasilkan nilai *voidage* yang lebih sedikit. Hal ini disebabkan semakin banyak jumlah *tuyere* yang mengalir udara akan menghasilkan nilai *voidage* antar *coal* yang sedikit, semakin sedikit *tuyere* yang mengalir udara maka nilai *voidage* antar *coal* semakin bertambah (Ghofoer 2018).



**Gambar 4.6** Rata-rata nilai *voidage* per variasi sudut *tuyere*

Selanjutnya menghitung rata-rata nilai *voidage* dari semua grid yang dihitung. Dari hasil grafik pada Gambar 4.6, sudut kemiringan  $11^\circ$  *tuyere* memiliki nilai *voidage* paling besar dan sudut kemiringan  $0^\circ$  *tuyere* memiliki nilai *voidage* paling kecil. Hal ini dikarenakan laju aliran partikel *coal* dari area sentral *blast furnace* dan lebar alirannya meningkat dengan meningkatkan sudut *tuyere* dan mencapai nilai maksimum mendekati  $11$  derajat (Umekage, et al. 2007).





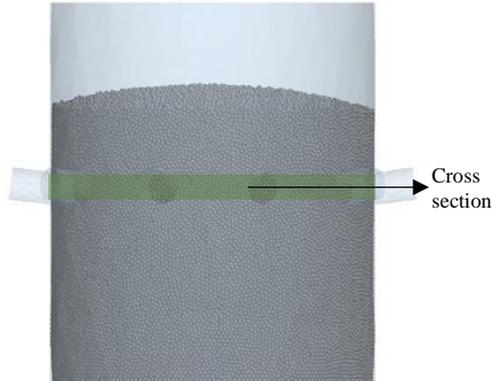
**Gambar 4.7** Profil *voidage* yang terbentuk pada variasi  $0^\circ$  *tuyere* (a),  $3^\circ$  *tuyere* (b),  $7^\circ$  *tuyere* (c), dan  $11^\circ$  *tuyere* (d).

#### 4.2.2 Profil Pembentukan *Raceway*

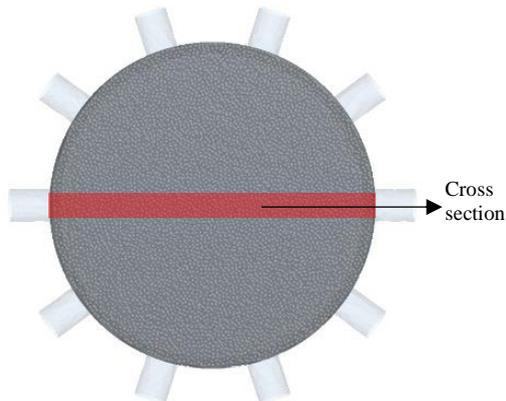
Proses aliran udara berkecepatan tinggi dari *tuyere* ke dalam MBF akan membentuk suatu daerah kosong yang disebut *raceway*. Pada area ini juga menentukan baik atau tidaknya proses reduksi pada *coal* sehingga menyebabkan reaksi yang baik juga pada MBF untuk menghasilkan produk logam yang lebih baik. Faktor yang mempengaruhi terbentuknya *raceway* adalah laju aliran dari *tuyere*, *voidage* antar *coal*, dan ukuran partikel *coal*.

Metode yang digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi sudut *tuyere* terhadap pembentukan *raceway* menggunakan

metode *slice clipping* sehingga membentuk cross section pada MBF di perangkat lunak EDEM 2017.2



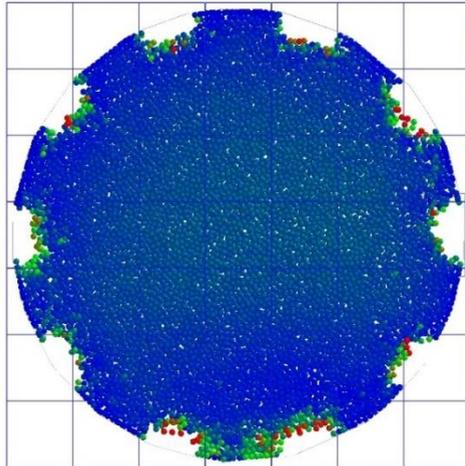
**Gambar 4.8** Area *horizontal cross section* MBF pada tuyere



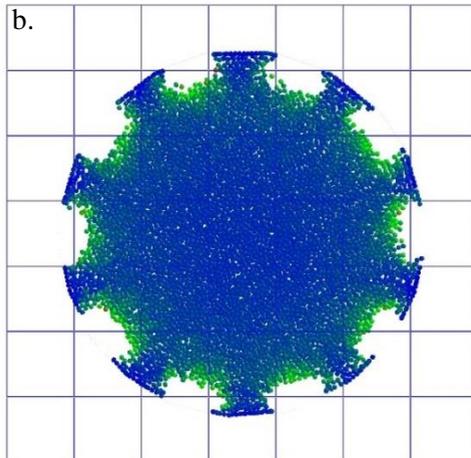
**Gambar 4.9** Area *vertical cross section* MBF pada tuyere

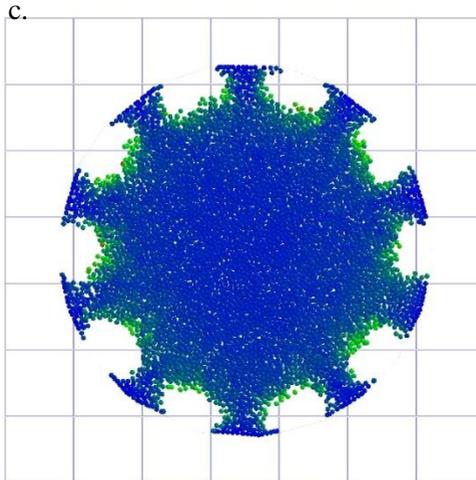
Setelah melakukan *clipping* menjadi *cross section* pada MBF. Kemudian didapatkan hasil bentuk raceway seperti pada Gambar 4.10 dan 4.11

a.

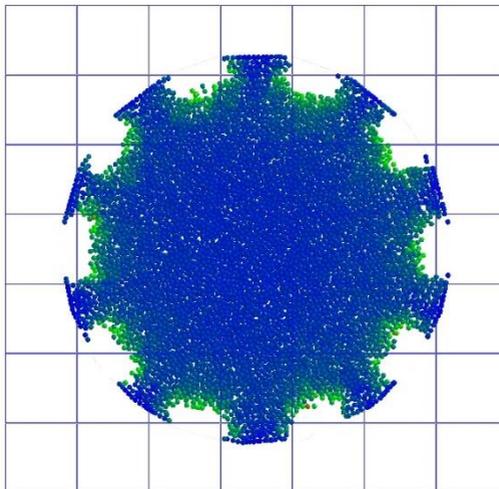


b.

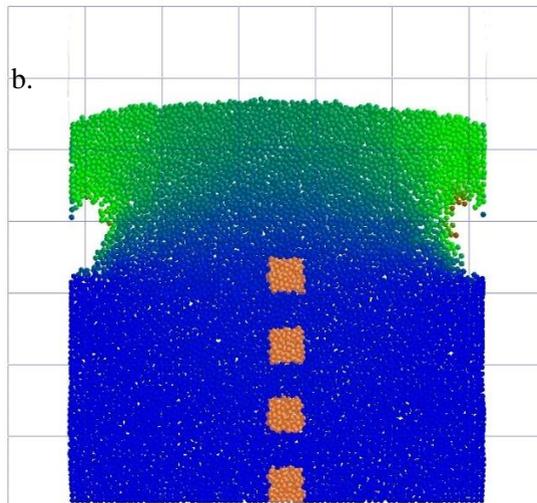
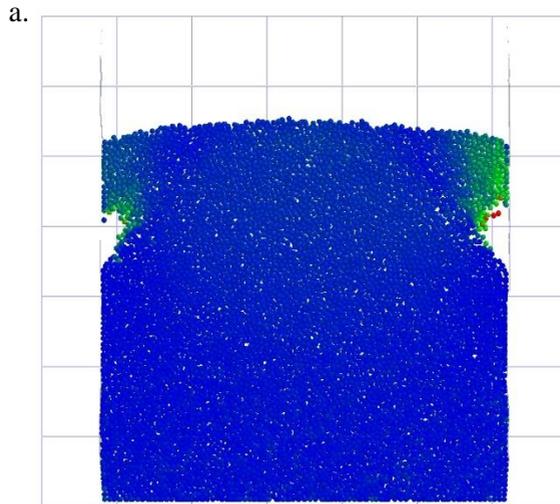


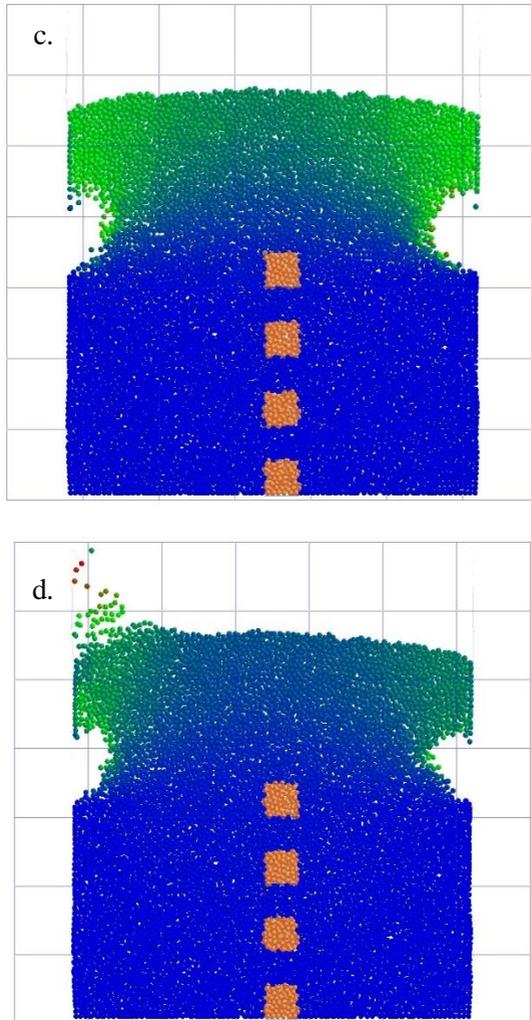


d.

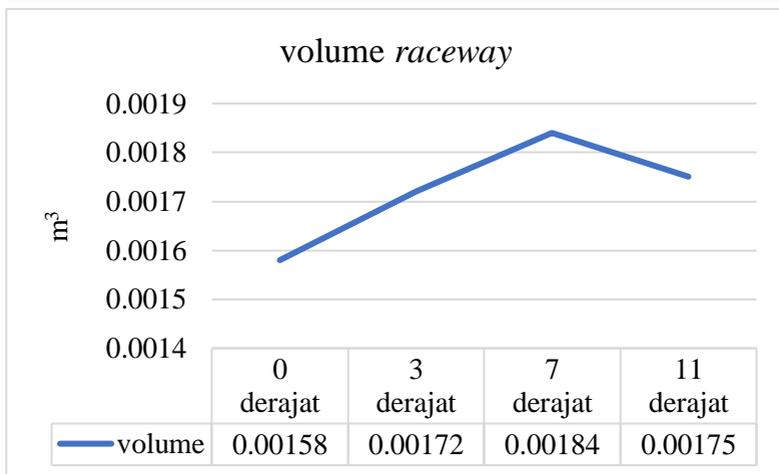


**Gambar 4.10** Profil *raceway* horizontal MBF terhadap distribusi *burden material* pada variasi sudut  $0^\circ$  *tuyere* (a),  $3^\circ$  *tuyere* (b),  $7^\circ$  *tuyere* (c), dan  $11^\circ$  *tuyere* (d).





**Gambar 4.11** *Vertical cross section MBF terhadap bentuk raceway pada distribusi burden material pada variasi sudut 0° tuyere (a), 3° tuyere (b), 7° tuyere (c), dan 11° tuyere (d).*



**Gambar 4.12** Grafik volume *raceway* pada variasi sudut *tuyere*

Dari hasil *raceway* yang didapatkan diatas, terdapat perbedaan bentuk *raceway* pada masing-masing variasi sudut *tuyere*. Pada *tuyere* dengan kemiringan sudut 7°, memiliki *raceway* terbesar karena *raceway* tersebut memiliki volume yang tinggi serta bentuk yang lebih *spherical* dibanding *tuyere* dengan variasi lain. Fenomena tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan Umekage pada tahun 2017, yaitu *raceway* berbentuk bulat dan besar dengan sudut 7 derajat karena pada saat aliran udara keluar dari *tuyere* 7°, aliran udara ke bawah dari dasar *raceway* meningkat. Demikian juga aliran udara keatas dari atas *raceway* juga meningkat sehingga menghasilkan bentuk *raceway* yang bulat dan besar (baik dari tinggi dan kedalaman *raceway*) laju aliran udara menjadi stabil, sehingga membuat aliran kokas seragam. Aliran udara ke daerah pusat blast furnace dan lebar alirannya juga meningkat dengan meningkatkan sudut ke bawah *tuyere* dan mencapai nilai maksimum di dekat 7 derajat.

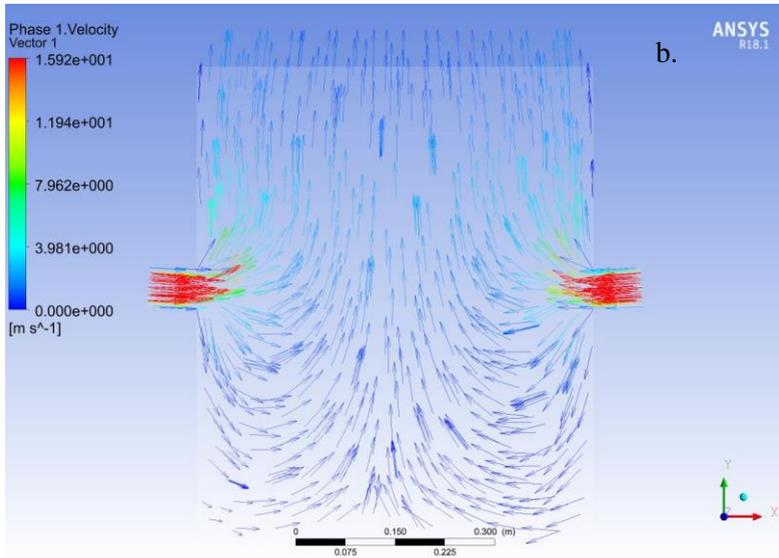
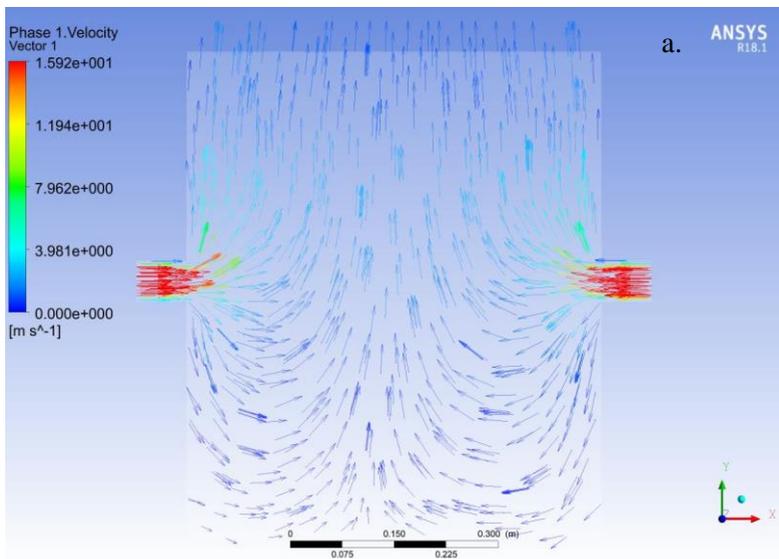
#### 4.2.3 Profil Distribusi Kecepatan Gas

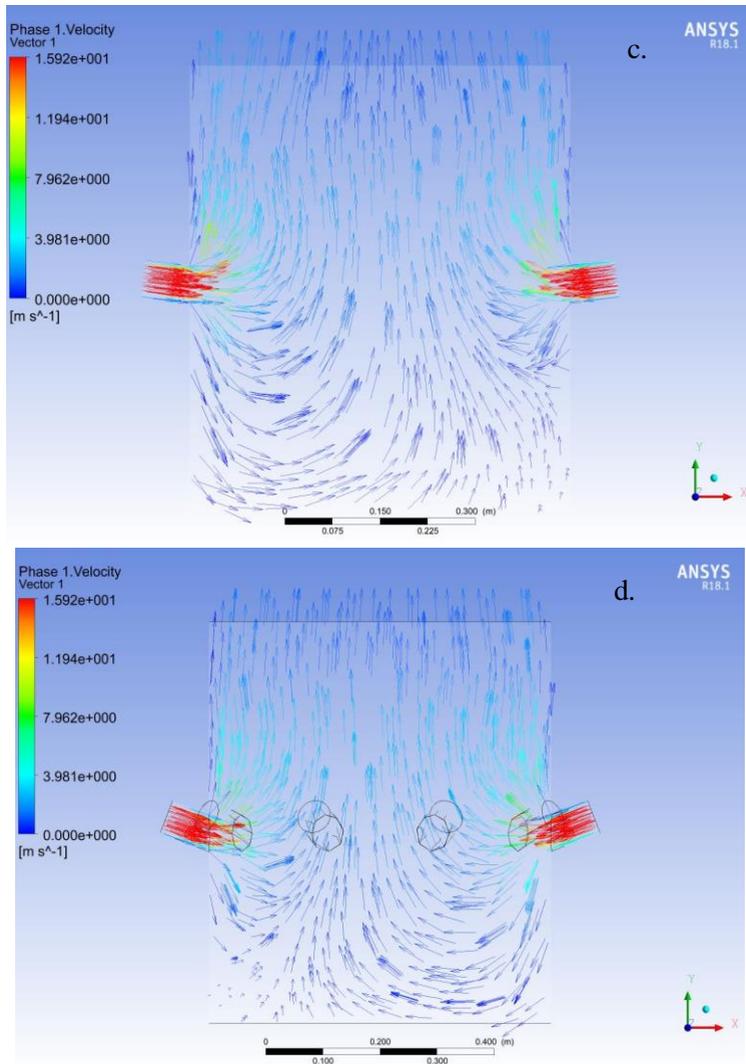
Peran distribusi aliran gas sangat penting untuk proses pengolahan logam nikel terutama pada daerah *bed* karena

---

menentukan baik atau tidaknya proses menghasilkan gas reduksi dengan *boudouard.reaction*, dimana gas reduksi juga berperan penting dalam mereduksi *ore* menjadi logam murni. Sehingga diperlukan suatu optimalisasi untuk mengamati distribusi kecepatan gas dengan pemodelan.

Metode untuk mengetahui distribusi kecepatan gas dengan menggunakan *cross section* pada perangkat Ansys CFD *Fluent* 18.1, kemudian didapatkan distribusi kecepatan gas pada MBF seperti pada Gambar 4.13

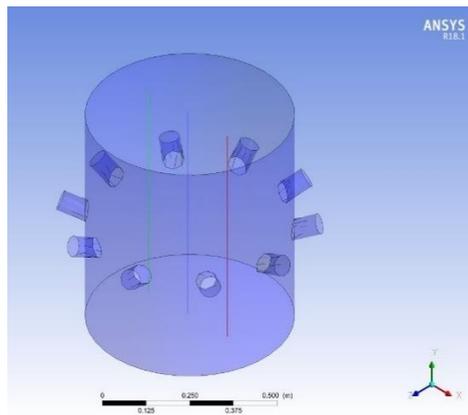




**Gambar 4.13** Profil distribusi kecepatan gas pada MBF pada variasi 0° *tuyere* (a), 3° *tuyere* (b), 7° *tuyere* (c), dan 11° *tuyere* (d).

Dari hasil gambar tersebut, zona merah menunjukkan kecepatan gas tertinggi sedangkan zona biru menunjukkan kecepatan gas terendah. Daerah yang mayoritas zona merah ini berada pada daerah *combustion zone* yaitu daerah yang vital dimana terdapat bagian masuknya udara dari *tuyere*. Daerah ini juga termasuk pembentukan *raceway* dikarenakan udara berkecepatan tinggi yang langsung mengalir dari *tuyere*. Kemudian *tuyere* dengan variasi sudut  $11^\circ$  memiliki *combustion zone* paling tinggi dikarenakan laju aliran udara tersebut mengalami turbulensi lebih banyak, seiring dengan peningkatan sudut *tuyere* (Ghofoer 2018).

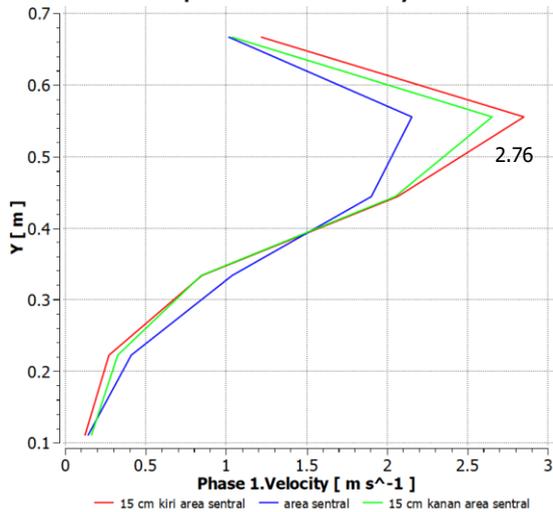
Pada *central area* diperlukan suatu pemahaman pentingnya distribusi kecepatan gas karena dapat mengetahui apakah distribusi kecepatan gas merata atau tidak dan mengamati seberapa tinggi kecepatan gas pada *central area*. Metode perhitungan nilai kecepatan gas pada *central area* MBF menggunakan *line* terhadap ketinggian pada *central area* (biru), 15 cm di sebelah kiri dari *central area* (hijau), dan 15 cm di sebelah kanan dari *central area* (merah).



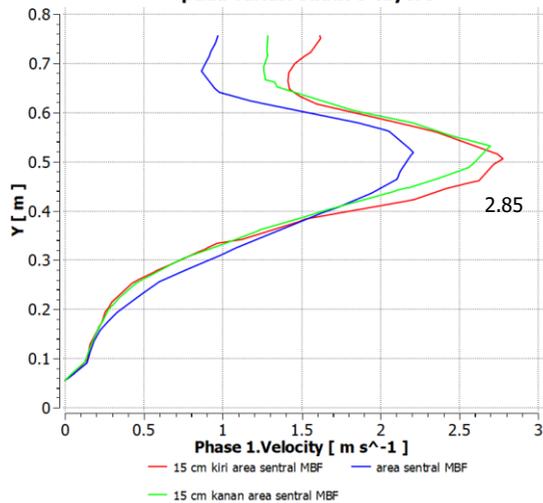
■ 15 cm dari *central area*    ■ *central area*    ■ 15 cm dari *central area*

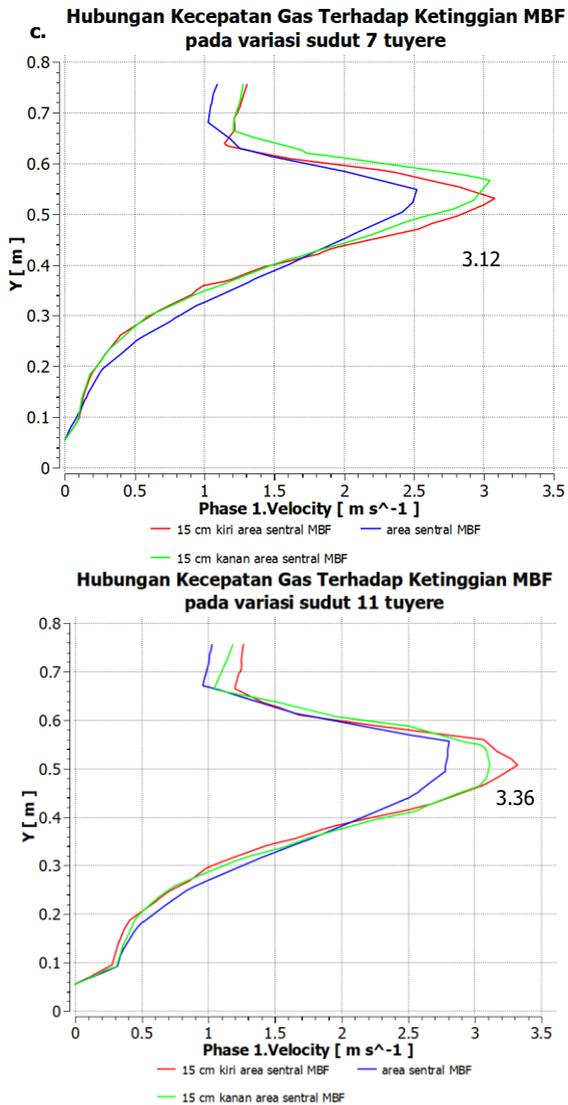
**Gambar 4.14** Metode *line* untuk perhitungan kecepatan gas terhadap ketinggian

**a. Hubungan Kecepatan Gas Terhadap Ketinggian MBF pada variasi sudut 0 tuyere**



**b. Hubungan Kecepatan Gas Terhadap Ketinggian MBF pada variasi sudut 3 tuyere**





**Gambar 4.15** Hubungan kecepatan gas terhadap ketinggian MBF dengan pada variasi sudut  $0^\circ$  tuyere (a),  $3^\circ$  tuyere (b),  $7^\circ$  tuyere (c).  $11^\circ$  tuyere (d).

Sumbu  $x$  menunjukkan nilai kecepatan dan sumbu  $y$  menunjukkan ketinggian MBF. Kemudian dari 4 grafik diatas mempunyai perbedaan masing-masing kecepatan gas pada setiap variasi sudut *tuyere*. Pada *central area*, kecepatan tertinggi berada pada ketinggian antara 50 cm dari dasar MBF dimana tepat area tersebut diantara *tuyere*. Fenomena ini dikarenakan adanya gas yang mengalir berkumpul pada *central area* menyebabkan naiknya volume gas. Kemudian kecepatan gas meningkat dikarenakan celah yang terbentuk tidak bertambah luas karena gas yang mengalir tersebut di *central area* (Ghofoer 2018). Kemudian hal ini diikuti juga dengan grafik pada 15 cm disebelah kiri dan kanan *central area* mengalami kecepatan gas yang tinggi karena jaraknya yang mendekati depan *tuyere*.

Dari hasil grafik diatas juga menunjukkan pada 15 cm disebelah kiri dan kanan *central area*, didapat pada variasi *tuyere* dengan sudut  $11^\circ$  sebesar 3,36 m/s, sudut  $7^\circ$  sebesar 3,12 m/s, sudut  $3^\circ$  sebesar 2.85 m/s, dan sudut  $0^\circ$  sebesar 2.76 m/s. Sehingga nilai kecepatan tertinggi didapat oleh *tuyere* dengan sudut  $11^\circ$  dan nilai kecepatan terendah didapat oleh *tuyere* dengan sudut  $0^\circ$ . Hal ini disebabkan laju aliran gas menuju *central area* dan lebar aliran gas meningkat dengan meningkatkan sudut *tuyere* (Umekage, et al. 2007). Kemudian arah gas yang menuju *central area* membuat kinerja proses para *central area* meningkatkan sehingga dikategorikan sebagai *central working furnace*. Pada *central working furnace*, area *wall* akan sedikit dialiri gas panas, sehingga *heat loss* yang dihasilkan juga sedikit. Namun karena *root of melting zone* berada di bagian bawah, resiko yang terjadi adalah *ore* tidak meleleh sepenuhnya sebelum melewati *tuyere* serta mudah merusak *tuyere*. *Central working furnace* ini dapat menjamin hasil proses yang sangat baik dan stabil dalam berhubungan dengan produktivitas, kualitas logam panas dan tingkat reduktan (Geerdes, et al. 2009). Kemudian, apabila kecepatan gas terlalu tinggi akan menyebabkan oksidasi yang cepat pada molten metal sehingga menghasilkan logam yang kurang baik saat melewati *tapping hole* pada *blast furnace*.

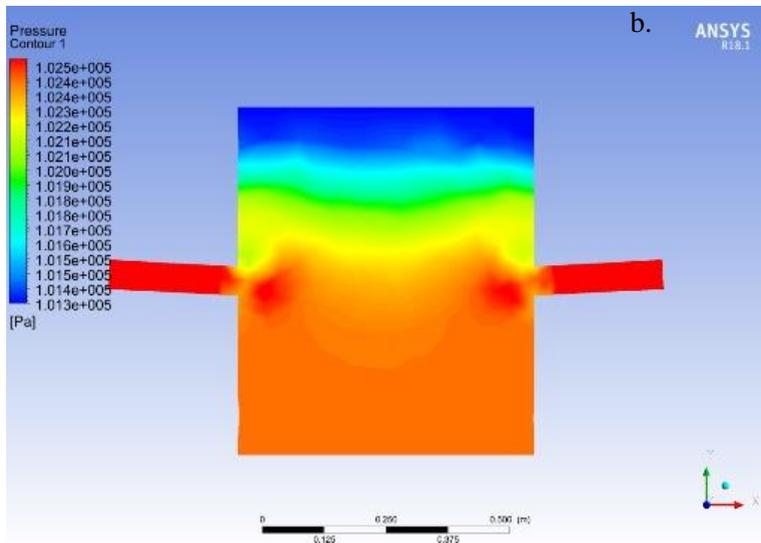
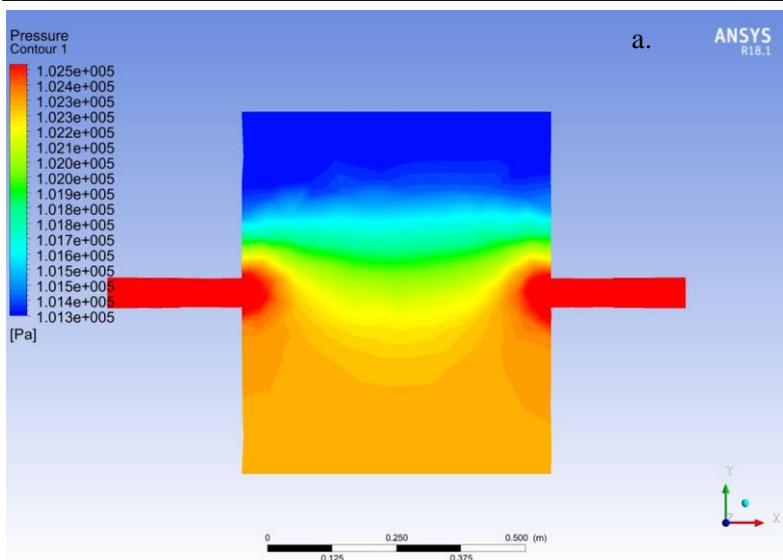
---

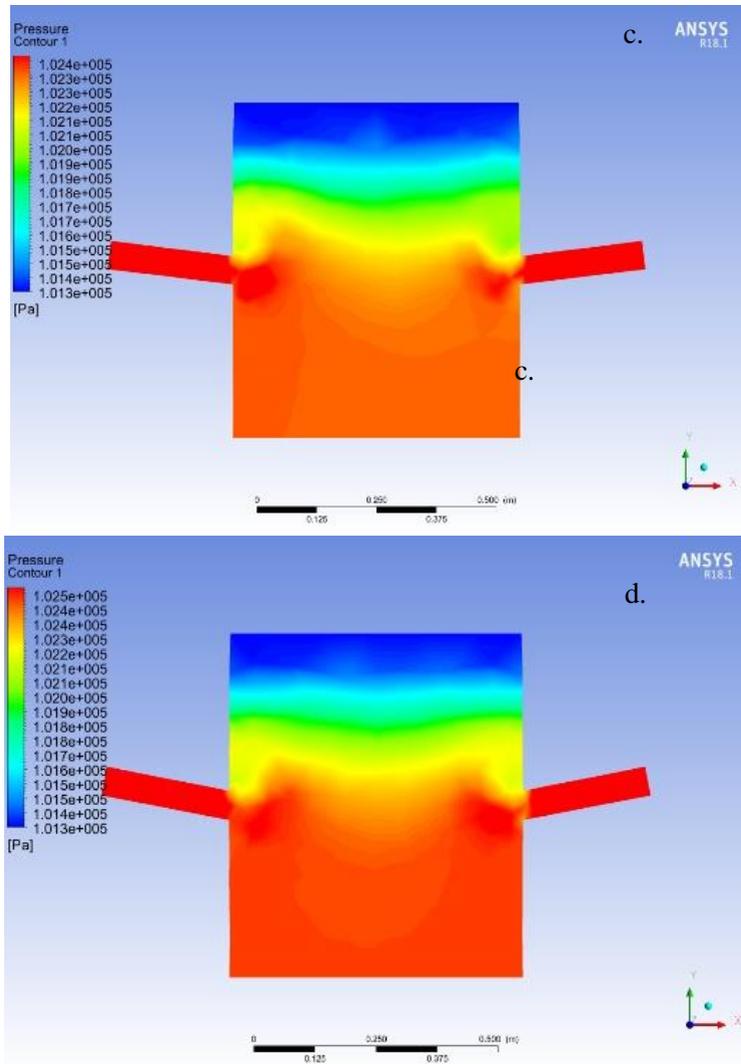
#### 4.2.4 Profil Distribusi Tekanan

Pengaruh distribusi tekanan sangat penting terhadap prinsip kerja MBF karena apabila laju aliran gas dari tuyere melewati *coal bed voidage*, maka menyebabkan perubahan suatu tekanan yang berbeda pada saat area sehingga distribusi tekanan pun terbentuk. Kemudian tekanan ini juga dipengaruhi ukuran *coal* pada *bed* dan permeabilitas partikel sehingga menentukan baik atau tidaknya proses reduksi di area *bed*.

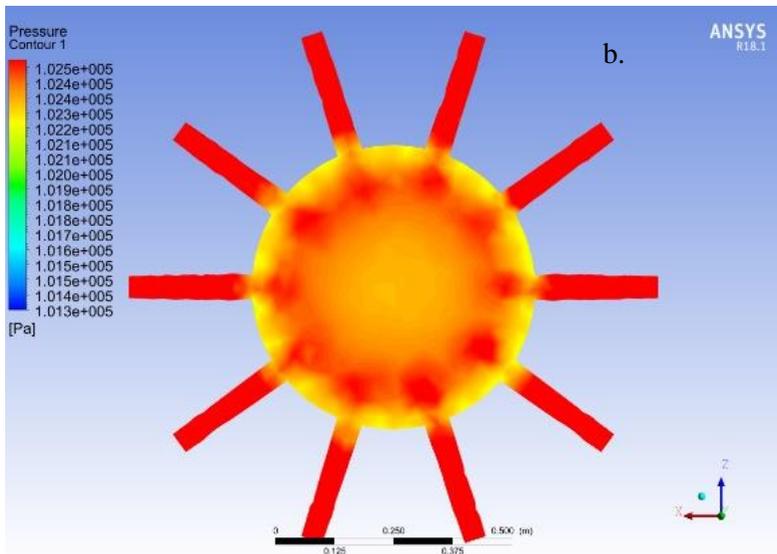
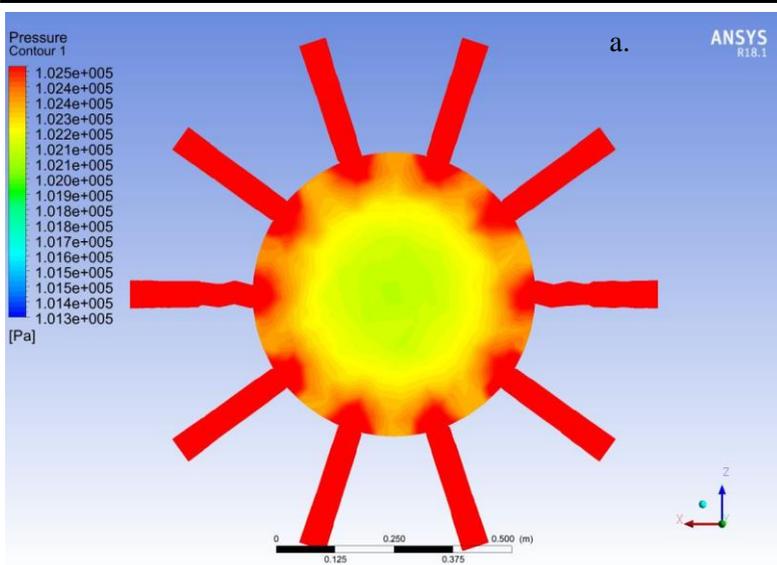
Metode untuk mengetahui distribusi tekanan menggunakan metode *plane* untuk membuat *cross section* pada hasil *coupling* pemodelan yang sudah didapat menggunakan perangkat lunak ANSYS CFD *Fluent* 18.1. *Cross section* bisa dilakukan dengan *vertical* menganalisis distribusi tekanan terhadap ketinggian dan *horizontal* pada geometri MBF untuk mengamati dan menganalisis distribusi tekanan secara merata dan mendetail. Untuk mengetahui nilai tekanan pada MBF menggunakan metode *contour* sehingga terlihat daerah mana yang terdistribusi tekanan yang tertinggi atau terendah.

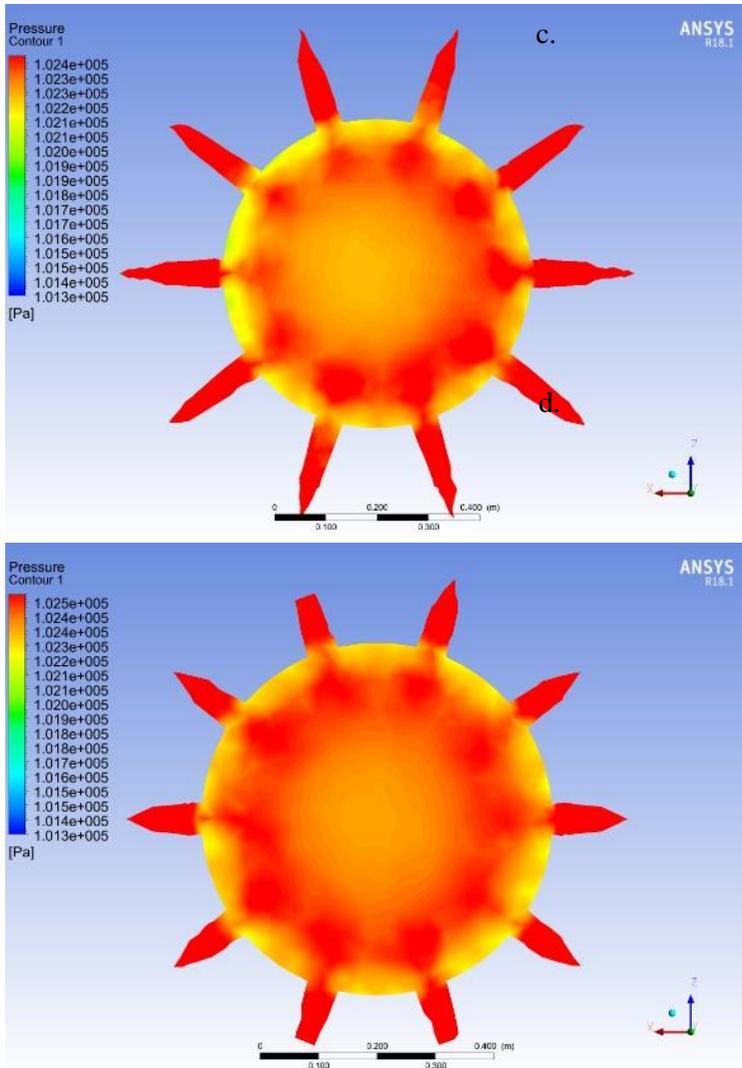
Setelah melakukan *cross section*, kemudian mendapatkan hasil distribusi tekanan pada MBF dimana warna merah menunjukkan nilai tekanan tertinggi dan warna biru menunjukkan nilai tekanan terendah. Seperti yang ditunjukkan pada Gambar.4.16 dan 4.17





**Gambar 4.16** Profil tekanan horizontal MBF pada variasi sudut  $0^\circ$  tuyere (a),  $3^\circ$  tuyere (b),  $7^\circ$  tuyere (c), dan  $11^\circ$  tuyere (d).



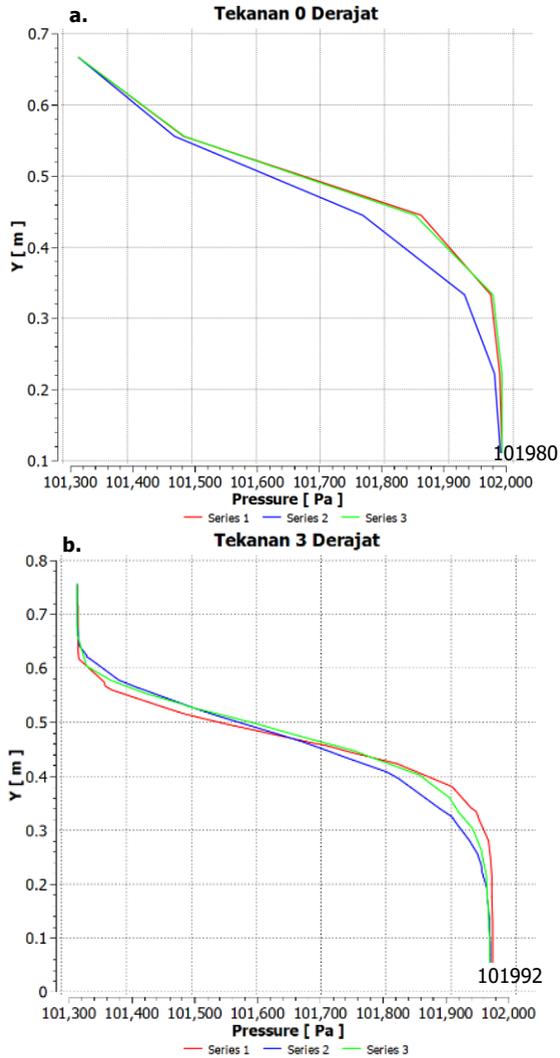


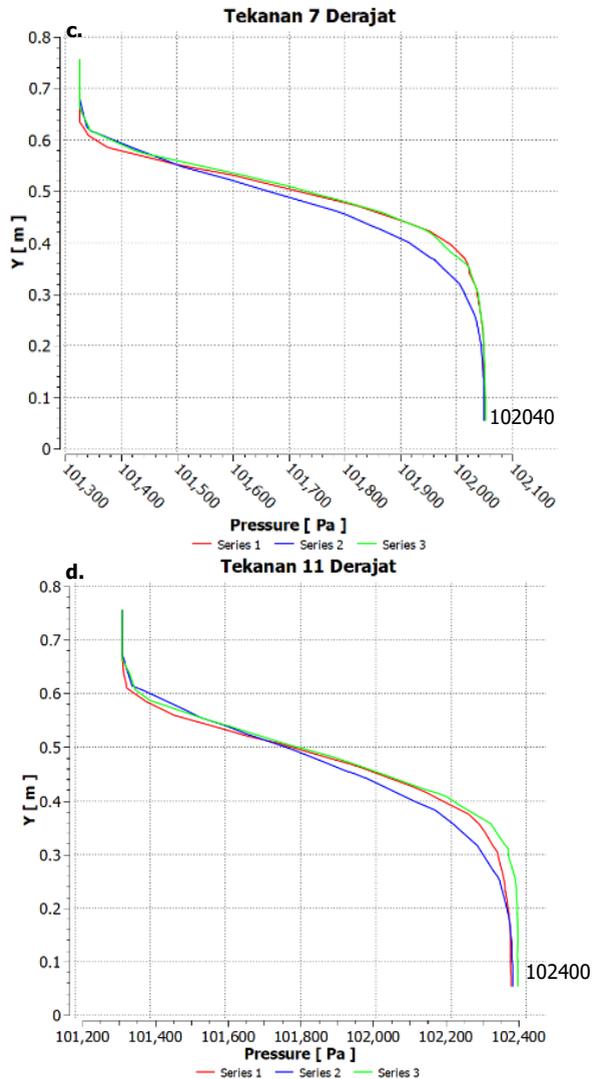
**Gambar 4.17** Profil tekanan vertikal MBF pada variasi  $0^\circ$  *tuyere* (a),  $3^\circ$  *tuyere* (b),  $7^\circ$  *tuyere* (c), dan  $11^\circ$  *tuyere* (d).

Dari hasil Gambar 4.14 distribusi tekanan tertinggi terdapat area di depan *tuyere* dikarenakan udara yang mengalami turbulensi sehingga aliran udara tertahan dan menyebabkan distribusi tekanan yang tinggi pula. Faktor aliran udara yang tertahan dipengaruhi oleh tebalnya *bed* dan *voidage* pada *coal* pada MBF. Sedangkan pada *central area* terlihat bahwa semakin bertambah ketinggian tekanan akan mengalami penurunan atau biasa disebut dengan *pressure drop*. Dimana hal ini dipengaruhi salah satu faktanya adalah *voidage* yang sebelumnya telah dibahas, dimana *voidage* di bawah area *tuyere* cenderung lebih kecil dibandingkan area di antara *tuyere*. (Adema 2014)

Dari hasil Gambar 4.15 menunjukkan distribusi tekanan tertinggi *tuyere* terdapat pada area di depan *tuyere*. Fenomena ini dikarenakan udara yang dialiri *tuyere* akan mengalir di depan *tuyere* akan mengalami turbulensi, sehingga menimbulkan tekanan yang tinggi pada area tersebut. Kemudian pada saat aliran udara menuju area sentral, akan mendapatkan nilai tekanan yang rendah karena jarak aliran *tuyere* yang semakin jauh ke *central area*, sehingga distribusi tekanan pada *central area* juga sedikit.

Setelah mengetahui distribusi tekanan pada MBF, kemudian menganalisis nilai tekanan pada setiap variasi sudut *tuyere* dengan menggunakan metode *line* terhadap ketinggian pada *central area* (biru), 15 cm di sebelah kiri dari *central area* (hijau), dan 15 cm di sebelah kanan *central area* (merah). Metode tersebut sama seperti menganalisis nilai kecepatan gas terhadap ketinggian MBF.





**Gambar 4.18** Hubungan tekanan terhadap ketinggian MBF pada variasi sudut  $0^\circ$  tuyere (a),  $3^\circ$  tuyere (b),  $7^\circ$  tuyere (c), dan  $11^\circ$  tuyere (d).

Sumbu x grafik menunjukkan nilai tekanan dan sumbu y grafik menunjukkan ketinggian MBF. Dari grafik di atas menunjukkan nilai tekanan terhadap ketinggian MBF. Nilai tekanan yang didapat setiap variasi sudut *tuyere* adalah 101980 Pa (3°), 101992 Pa (3°) 102040 Pa (7°), dan 102400 Pa (11°). Nilai tersebut didapatkan dari perhitungan tiga *line* sehingga mendapatkan 3 nilai tekanan yang berbeda kemudian diambil nilai maksimal tekanan yang didapatkan. Kemudian nilai tekanan tertinggi didapat pada *tuyere* dengan sudut 11°, diikuti *tuyere* dengan sudut 7°, sudut 3° dan nilai tekanan terkecil terdapat pada *tuyere* dengan sudut 0°. Fenomena tersebut dipengaruhi oleh udara yang dialiri *tuyere* meningkat yang disebabkan sudut *tuyere* yang meningkat, sehingga arah laju udara menjadi cepat kemudian mempengaruhi *bed* saat menembus *voidage* pada *coal* sehingga tekanan juga meningkat seiring dengan meningkatkan sudut *tuyere*. (Kurniawan, 2019)

Kemudian dari grafik tersebut terlihat nilai tekanan semakin menurun seiring dengan bertambahnya ketinggian. Hal ini dikarenakan tekanan akan mengalami penurunan atau biasa disebut dengan *pressure drop* yang dipengaruhi salah satu faktanya adalah *voidage*, dimana *voidage* di bawah area *tuyere* cenderung lebih kecil dibandingkan area di antara *tuyere*. (Adema 2014). Pengaruh *pressure drop* yang tinggi menyebabkan hambatan aliran gas semakin besar, sehingga aliran gas tertahan dan tidak mengalir ke atas MBF, dan reaksi reduksi menjadi tidak optimal.

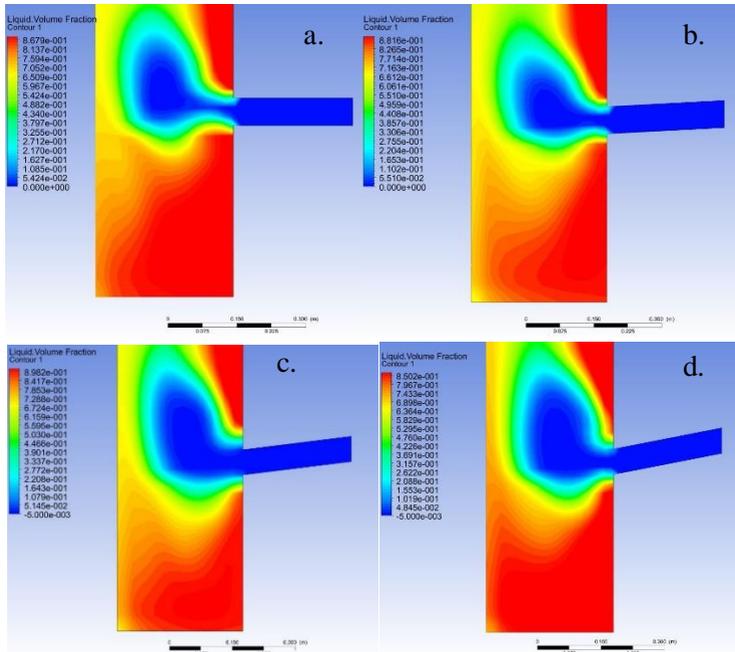
### 4.3 Pengaruh Variasi Sudut *Tuyere* terhadap *Gas-Solid-Liquid Phase*

Dalam penggunaan *Fluent (gas-liquid phase)* menggunakan metode *Eulerian Multiphase*. Pada fasa *liquid* menggunakan *molten metal* nikel dan fasa *solid* menggunakan *coal* sebagai objek untuk diberi fluida berupa gas menggunakan perangkat lunak ANSYS CFD *Fluent* 18.1. Serta perlunya mengetahui fenomena yang terjadi pada MBF dimana fasa *liquid* juga berpengaruh terhadap proses pengolahan nikel pada MBF

### 4.3.1 Profil Distribusi Fasa pada MBF

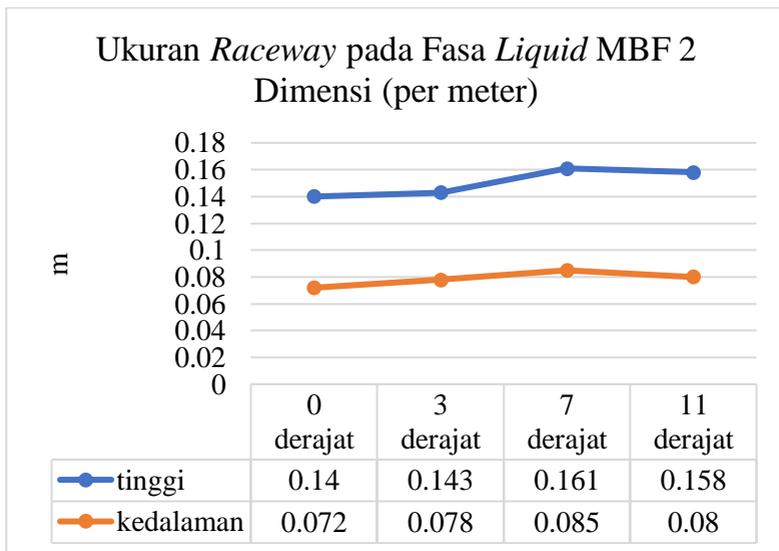
Profil *liquid phase* berkaitan erat dengan laju aliran udara pada MBF. Sehingga penting sekali untuk melakukan simulasi permodelan aliran fasa *liquid* melewati fasa *solid (coal)* pada MBF untuk mengetahui dan menganalisis hal tersebut.

Metode yang digunakan untuk mengetahui pengaruh variasi sudut *tuyere* terhadap profil *liquid* menggunakan metode *contour* dan berfokus pada area bawah MBF (dari dasar hingga zona kohesif MBF = 0.7 m) untuk menunjukkan *volume fraction* pada hasil pemodelan MBF yang berbentuk 2 dimensi. Hasil metode tersebut terdapat pada Gambar 4.19.



**Gambar 4.19** Profil fasa *liquid* MBF pada variasi sudut 0° *tuyere* (a), 3° *tuyere* (b), 7° *tuyere* (c), dan 11° *tuyere* (d).

Dari hasil gambar yang didapatkan diatas, terdapat aliran profil yang berbeda-beda pada masing-masing variasi sudut *tuyere*. Pada *tuyere* dengan kemiringan sudut  $3^\circ$  memiliki profil fasa *liquid* yang jauh dari depan *tuyere* dikarenakan aliran udara yang berinteraksi sehingga menghembuskan fasa *liquid*. Pada *tuyere* dengan kemiringan sudut  $11^\circ$  memiliki profil fasa *liquid* yang hampir sama dengan kemiringan sebelumnya. Pada *tuyere* dengan kemiringan sudut  $7^\circ$  memiliki profil *voidage* yang lebih besar dari depan *tuyere* dibanding dua variabel lain. Hal tersebut dikarenakan sifat viskositas yang rendah pada *liquid* sehingga membuat *liquid* terhembus lebih jauh dibanding fasa solid. Kemudian menghitung tinggi dan kedalaman *raceway* menggunakan metode *line* pada fluent, sehingga mendapatkan grafik seperti pada gambar 4.19



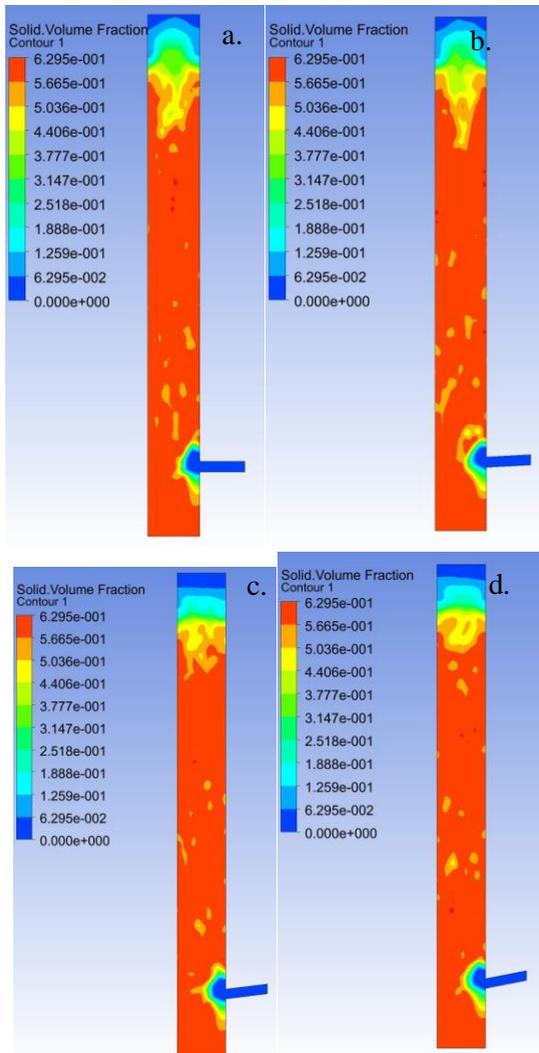
**Gambar 4.20.** Grafik ukuran *raceway* pada fasa *liquid* terhadap variasi sudut *tuyere*.

Dari grafik diatas menunjukkan bahwa *tuyere* dengan kemiringan sudut  $7^\circ$  memiliki ukuran *raceway* yang lebih besar

---

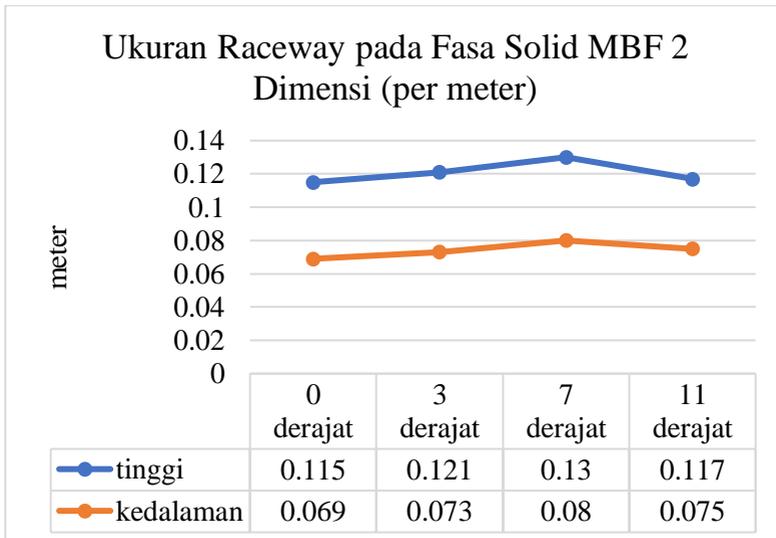
dibanding dua variasi sudut lain. Hal ini membuat raceway berbentuk bulat dan besar dengan sudut 7 derajat, sehingga membuat aliran kokas seragam. Aliran udara ke daerah pusat blast furnace dan lebar alirannya juga meningkat dengan meningkatkan sudut ke bawah tuyere dan mencapai nilai maksimum di dekat 7 derajat (Umekage, et al. 2007). Lalu fraksi volume tertinggi berada di bawah MBF karena merupakan area *hearth*, dimana area tersebut menyimpan *molten metal* hasil reduksi pada MBF sehingga menumpuk di dasar MBF dan keluar melewati *ladle*. (Shen, 2013)

Kemudian, menganalisis fasa solid pada geometri MBF 2 dimensi dengan menggunakan metode *contour* pada CFD-Post dengan variasi fraksi solid seperti pada gambar 4.21.



**Gambar 4.21** Profil fasa *solid* MBF pada variasi sudut  $0^\circ$  *tuyere* (a),  $3^\circ$  *tuyere* (b),  $7^\circ$  *tuyere* (c), dan  $11^\circ$  *tuyere* (d).

Dari hasil fraksi solid yang didapatkan diatas, terdapat perbedaan bentuk *raceway* pada masing-masing variasi sudut *tuyere* akibat aliran udara dari *tuyere* yang melewati fasa solid tersebut. Kemudian menghitung tinggi dan kedalaman *raceway* menggunakan metode *line* pada fluent, sehingga mendapatkan grafik seperti pada gambar 4.20.



**Gambar 4.22** Grafik ukuran *raceway* pada fasa solid terhadap variasi sudut *tuyere*.

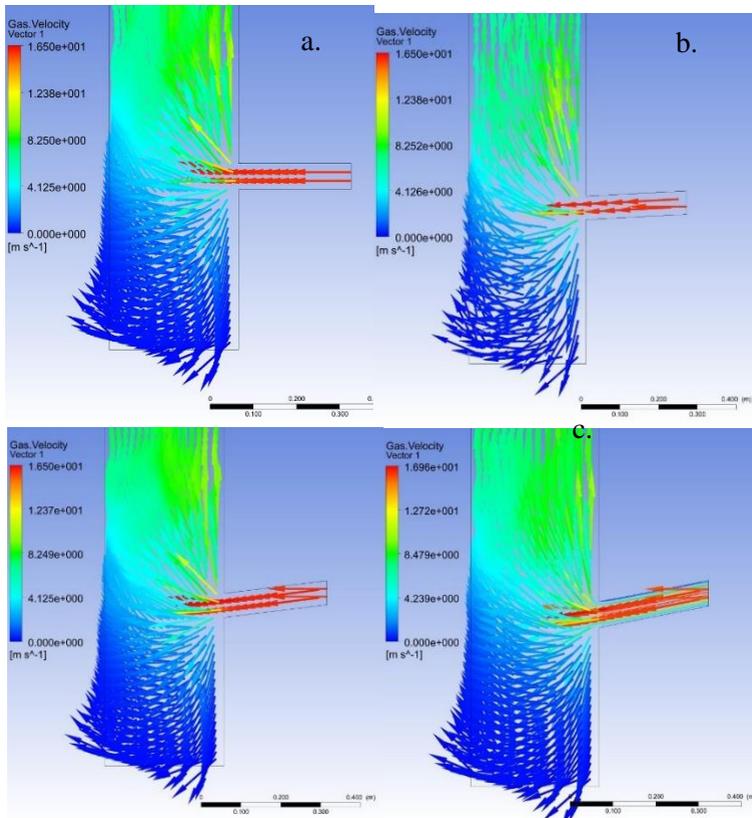
Pada *tuyere* kemiringan sudut  $7^\circ$ , memiliki *raceway* terbesar karena *raceway* tersebut mempunyai kedalaman dan tinggi yang lebih besar serta bentuk yang lebih *spherical* dibanding *tuyere* dengan variasi lain. Fenomena tersebut sesuai dengan penelitian yang dilakukan Umekage pada tahun 2017, yaitu dimana *raceway* berbentuk bulat dan besar dengan sudut 7 derajat dikarenakan aliran udara ke *raceway* atas dan bawah meningkat, sehingga membuat aliran kokas seragam. Aliran udara ke daerah pusat *blast furnace* dan lebar alirannya juga meningkat dengan meningkatkan

sudut ke bawah *tuyere* dan mencapai nilai maksimum di dekat 7 derajat.

#### 4.3.2 Profil Distribusi Kecepatan Gas

Setelah mengetahui fenomena distribusi kecepatan gas pada *gas-solid phase*. Kemudian menganalisis distribusi kecepatan gas pada *gas-solid-liquid phase* karena di dalam MBF terdapat *coal* sebagai solid dan *molten metal* yang berperan sebagai liquid dimana arah *liquid (molten metal)* mengarah ke bawah melewati *void* antar *coal* karena pengaruh gravitasi sehingga *liquid* akan berkumpul di bagian paling bawah MBF yaitu *hearth zone*. Sehingga berpengaruh terhadap aliran gas dan menentukan proses reduksi yang terjadi pada *coal* dan gas yang menuju ke atas MBF.

Setelah melakukan input sifat mekanik kedua fasa, kemudian melakukan proses *solution* untuk mengetahui dan mengamati fenomena yang terjadi pada MBF tersebut serta distribusi kecepatan gas dan mendapatkan hasil distribusi kecepatan terhadap liquid (*molten metal*) yang berada di dalam MBF. Untuk mengetahui distribusi kecepatan gas menggunakan metode *vector*, pada MBF 2 dimensi sehingga seperti pada Gambar 4.23.



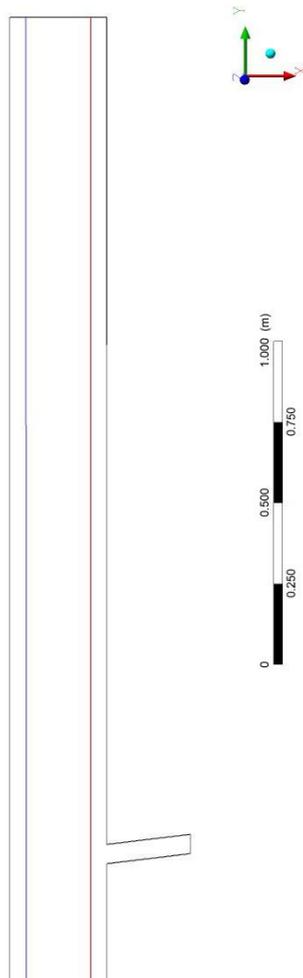
**Gambar 4.23** Profil vektor kecepatan gas MBF pada variasi sudut  $0^\circ$  tuyere (a),  $3^\circ$  tuyere (b),  $7^\circ$  tuyere (c), dan  $11^\circ$  tuyere (d)

Dari gambar di atas dapat menunjukkan profil dan arah kecepatan gas terhadap multifasa pada MBF. Pada *tuyere* kemiringan sudut  $0^\circ$ , aliran udara mengalami turbulensi kemudian arah gas melaju ke *wall area* MBF sehingga nantinya kerja MBF dikategorikan sebagai *wall working furnace*. Pada *tuyere* kemiringan sudut  $7^\circ$ , aliran gas dari *tuyere* mengarah ke *central area* MBF namun tidak signifikan karena turbulensi udara masih mendekati *wall area* pada MBF. Pada *tuyere* kemiringan sudut  $11^\circ$ ,

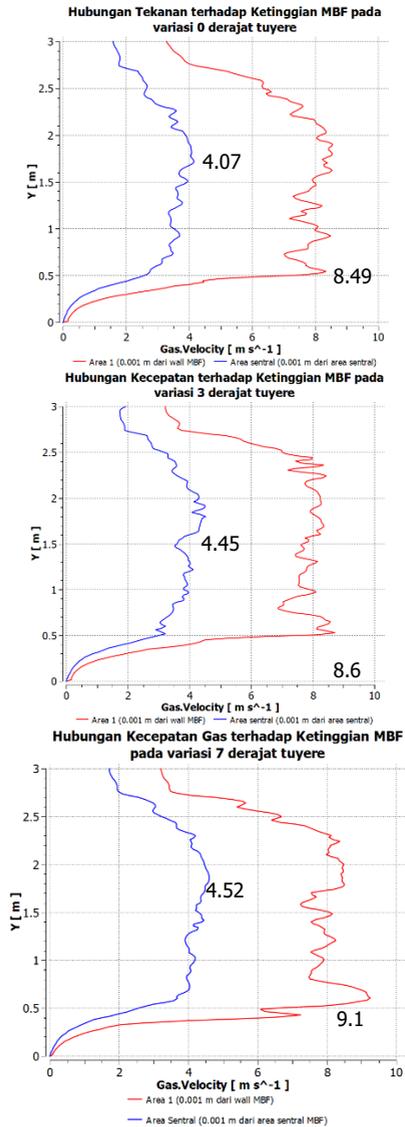
---

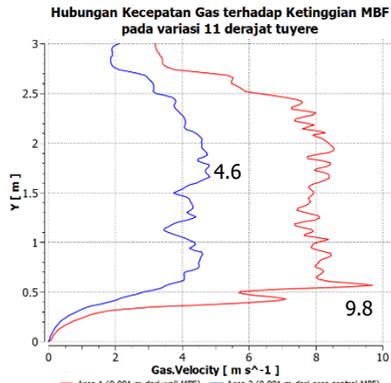
aliran gas mengarah ke *central area*, namun lebih baik dan distribusinya lebih tinggi dibanding aliran gas *tuyere* kemiringan sudut  $7^\circ$ . Fenomena ini disebabkan peningkatan sudut *tuyere* yang mengakibatkan laju aliran gas menuju *central area* dan lebar aliran gas meningkat (Umekage, et al. 2007). Sehingga aliran udara secara signifikan memasuki *central area* dimana cara kerja aliran gas di area tersebut dinamakan *central working furnace*. *Central working furnace* memproduksi hasil proses yang sangat baik dan stabil dalam berhubungan dengan produktivitas, kualitas logam panas dan tingkat reduktan (Geerdes, et al. 2009).

Setelah mengetahui distribusi kecepatan gas, kemudian melakukan perhitungan nilai kecepatan gas pada *central area* MBF menggunakan *line* terhadap ketinggian pada *central area* (biru), 15 cm di sebelah kiri dari *central area* (hijau), dan 15 cm di sebelah kanan dari *central area* (merah) menggunakan ANSYS CFD Fluent 18.1



**Gambar 4.24** Metode *line* untuk perhitungan nilai kecepatan gas terhadap ketinggian MBF.



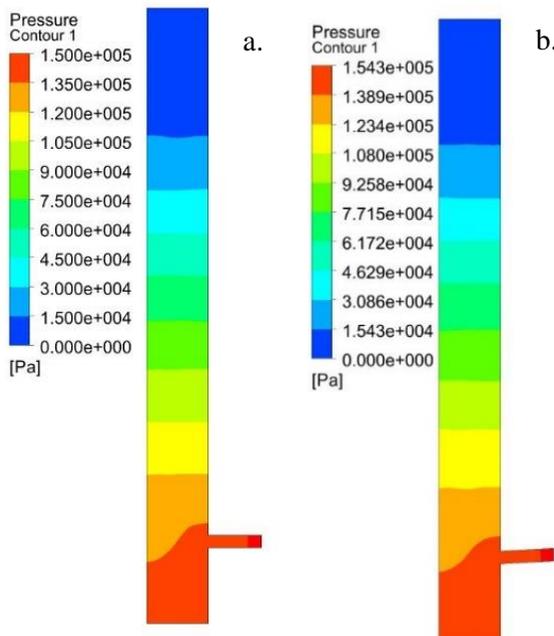


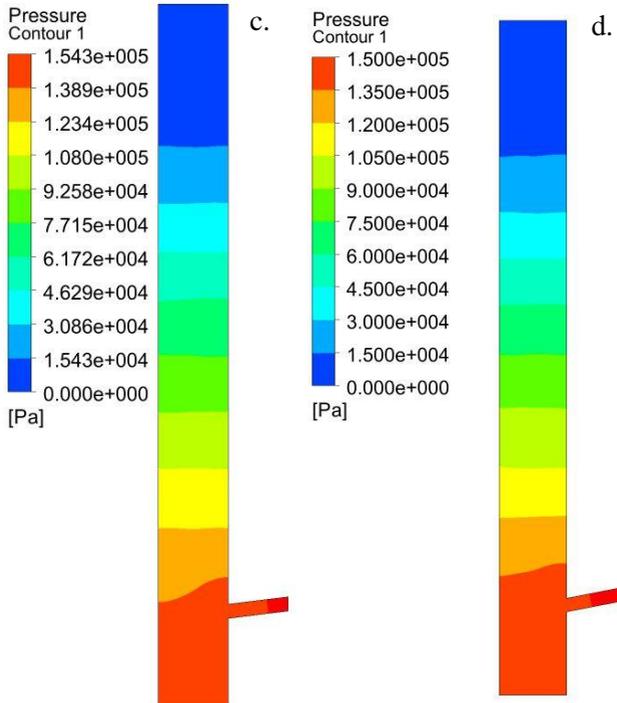
**Gambar 4.25** Grafik kecepatan gas dengan pada variasi sudut  $0^\circ$  tuyere (a),  $3^\circ$  tuyere (b),  $7^\circ$  tuyere (c), dan  $11^\circ$  tuyere (d).

Sumbu x grafik menunjukkan nilai kecepatan dan sumbu y grafik menunjukkan ketinggian MBF. Dari hasil grafik diatas juga menunjukkan pada 15 cm disebelah kanan *central area*, didapat nilai kecepatan gas pada variasi *tuyere* dengan sudut  $11^\circ$  sebesar 9,8 m/s, sudut  $7^\circ$  sebesar 9.1 m/s dan sudut  $3^\circ$  sebesar 8.6 m/s, dan sudut  $0^\circ$  sebesar 8.49 m/s. Pada *central area*, didapat nilai kecepatan gas pada variasi *tuyere* dengan sudut  $11^\circ$  sebesar 4.6 m/s, sudut  $7^\circ$  sebesar 4.52 m/s dan sudut  $3^\circ$  sebesar 4.45 m/s. Sehingga nilai kecepatan tertinggi didapat oleh *tuyere* dengan sudut  $11^\circ$  dan nilai kecepatan terendah didapat oleh *tuyere* dengan sudut  $0^\circ$ . Hal ini disebabkan laju aliran gas menuju *central area* dan lebar aliran gas meningkat dengan meningkatkan sudut *tuyere* (Umekage, et al. 2007). Namun, apabila kecepatan gas terlalu tinggi akan menyebabkan oksidasi yang cepat pada *molten metal* sehingga menghasilkan logam yang kurang baik saat melewati *tapping hole* pada *blast furnace*. Maka dipilih suatu sudut paling kecil agar hasil reduksi yang dihasilkan optimal.

### 4.3.3 Profil Distribusi Tekanan

Adanya *liquid* pada MBF dapat mempengaruhi fenomena yang terjadi pada distribusi tekanan di dalamnya selain dipengaruhi oleh *coal* pada *bed*. Metode untuk mengetahui distribusi tekanan menggunakan metode *contour* untuk membuat *cross section* pada hasil pemodelan yang didapat menggunakan perangkat lunak ANSYS CFD *Fluent* 18.1. geometri MBF 2 dimensi untuk mengamati dan menganalisis distribusi tekanan secara merata dan mendetail. Untuk mengetahui nilai tekanan pada MBF menggunakan metode *contour* sehingga terlihat daerah mana yang terdistribusi tekanan yang tertinggi atau terendah. Kemudian mendapat hasil yang ditunjukkan pada Gambar 4.20



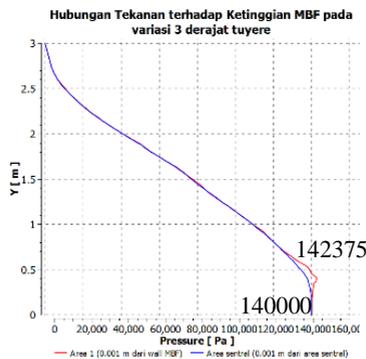
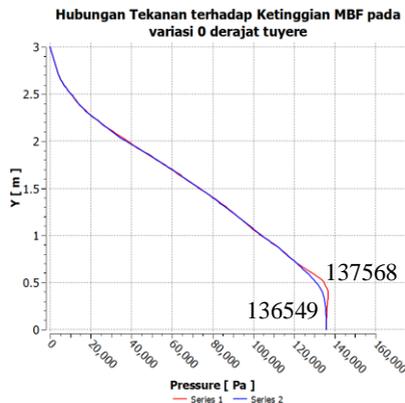


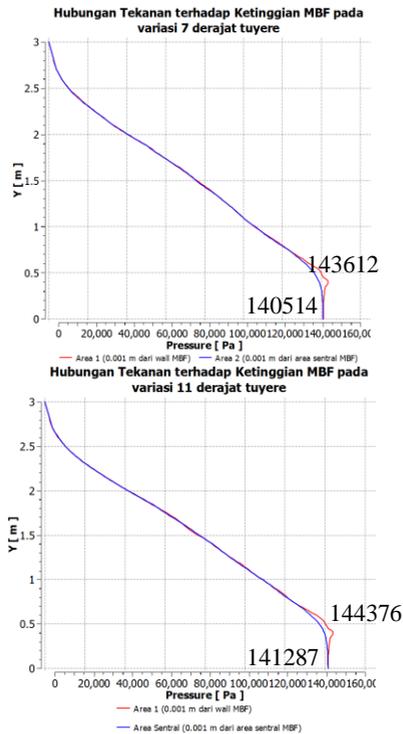
**Gambar 4.26** Profil distribusi tekanan MBF 2 dimensi variasi sudut  $0^\circ$  *tuyere* (a),  $3^\circ$  *tuyere* (b),  $7^\circ$  *tuyere* (c), dan  $11^\circ$  *tuyere* (d).

Dari gambar diatas menunjukkan distribusi tekanan yang beragam terhadap variasi sudut *tuyere* pada MBF. Pada *tuyere* dengan sudut  $0^\circ$  dan  $3^\circ$ , profil tekanan maksimal berada pada bagian bawah *tuyere* namun distribusinya tidak sebanyak variasi lain dan pada area sentral, distribusi tekanan menurun. Pada *tuyere* dengan sudut  $7^\circ$ , distribusi tekanan lebih tinggi dimana tekanan pada area sentral lebih besar. Pada *tuyere* dengan sudut 11, distribusi tekanan lebih tinggi baik dari area *wall* maupun area *sentral*. Fenomena tersebut membuat kerja reduksi terdapat pada *central area* yang dikategorikan *central working furnace*. Fenomena ini sama dengan fenomena yang terjadi pada *gas-solid*

*phase*, dimana semakin meningkat sudut *tuyere*, maka arah distribusi tekanan semakin mendekati *central area* MBF. Fenomena ini dikarenakan adanya gas yang mengalir berkumpul pada *central area* menyebabkan naiknya volume gas. Kemudian kecepatan gas meningkat dikarenakan celah yang terbentuk tidak bertambah luas karena gas yang mengalir tersebut di *central area* (Ghofoer 2018).

Kemudian melakukan perhitungan nilai tekanan pada *central area* MBF menggunakan *line* terhadap ketinggian seperti pada gambar 4.24 menggunakan ANSYS CFD Fluent 18.1.





**Gambar 4.27** Grafik tekanan dengan pada variasi sudut  $0^\circ$  tuyere (a),  $3^\circ$  tuyere (b),  $7^\circ$  tuyere (c), dan  $11^\circ$  tuyere (d).

Sumbu x grafik menunjukkan nilai tekanan dan sumbu y menunjukkan ketinggian MBF. Dari grafik diatas menunjukkan nilai tekanan pada MBF. Dari data tersebut, tekanan pada semua variasi sudut *tuyere* mengalami kenaikan di area *tuyere* (0.4-0.5) dikarenakan aliran gas yang kencang tertahan di depan *tuyere* karena aliran gas yang terhambat dan memasuki area porositas (*void*) sehingga terjadi *pressure drop* pada MBF (Geerdes, et al. 2009). Namun mengalami kenaikan nilai tekanan pada saat MBF diatas 0.5 cm. Nilai tekanan yang didapat setiap variasi sudut *tuyere* adalah 137568 Pa ( $0^\circ$ ), 142375 Pa ( $3^\circ$ ), 143612 Pa ( $7^\circ$ ), dan 144376 Pa ( $11^\circ$ ). Nilai tersebut didapatkan dari perhitungan dua

---

*line* sehingga mendapatkan 2 nilai tekanan yang berbeda kemudian diambil nilai maksimal tekanan yang didapatkan. Kemudian nilai tekanan tertinggi baik area sentral maupun area depan *tuyere* didapat pada *tuyere* dengan sudut  $11^\circ$  dan nilai tekanan terkecil terdapat pada *tuyere* dengan sudut  $0^\circ$ . Fenomena ini sesuai dengan penelitian yang dilakukan oleh Kurniawan pada tahun 2019 dimana tekanan gas meningkat terhadap peningkatan sudut *tuyere*.

*(Halaman ini sengaja dikosongkan)*

## BAB V

### KESIMPULAN DAN SARAN

#### 5.1 Kesimpulan

Berdasarkan analisis dan pembahasan yang telah dilakukan, maka kesimpulan dapat ditarik sebagai berikut :

1. Variasi sudut *tuyere* berpengaruh pada interaksi antar fasa. Pada *gas-solid phase*, semakin meningkat sudut *tuyere* maka *voidage* pada coal semakin besar, *voidage* terbesar dari terkecil pada sudut *tuyere* secara berurutan adalah  $11^\circ$ ,  $7^\circ$ ,  $3^\circ$ , dan  $0^\circ$ . Pada pembentukan *raceway*, *raceway* terbesar terdapat pada *tuyere* dengan sudut  $7^\circ$  pada *gas-solid phase*. Hal ini berlaku pada *gas-solid-liquid phase* dimana hembusan fasa terbesar terdapat pada variasi sudut *tuyere* secara berurutan adalah  $7^\circ$ ,  $11^\circ$ ,  $3^\circ$ , dan  $0^\circ$ .
2. Variasi sudut *tuyere* berpengaruh terhadap profil distribusi tekanan pada multifasa MBF, dimana semakin meningkatnya sudut *tuyere* maka nilai tekanan juga semakin tinggi. Pada *gas-solid phase*, *tuyere* dengan sudut  $11^\circ$  memiliki nilai tekanan tertinggi dan *tuyere* dengan sudut  $0^\circ$  memiliki nilai tekanan terendah. Hasil ini juga berlaku pada *gas-solid-liquid phase* dimana sudut  $11^\circ$  memiliki nilai tekanan tertinggi dan *tuyere* dengan sudut  $0^\circ$  memiliki nilai tekanan terendah.
3. Variasi sudut *tuyere* mempengaruhi profil kecepatan gas pada multifasa MBF. Semakin meningkat sudut *tuyere*, maka semakin naik juga nilai kecepatan gas. Hal ini berlaku pada *gas-solid phase* dan *gas-solid-liquid phase* dimana sudut  $11^\circ$  memiliki nilai kecepatan gas tertinggi dan *tuyere* dengan sudut  $0^\circ$  memiliki nilai kecepatan gas terendah.

#### 5.2 Saran

Saran yang dapat diberikan pada penelitian kedepannya adalah :

1. Perlu adanya simulasi pemodelan pada variasi *tuyere* lain terkait menganalisis fenomena multifasa pada MBF dengan mengasumsikan *heat transfer* dan *mass transfer* dalam bentuk DEM-CFD *Coupled*.
2. Pelajari dari tugas akhir tahun-tahun sebelumnya, selain dari jurnal atau buku terkait pemahaman pemodelan MBF.
3. Agar hasil maksimal, perbanyaklah *trial* dan *error*.

## DAFTAR PUSTAKA

- Abhale, P. B., N. N. Viswanathan, dan N. B. Ballal. 2009. "Efficient Simulation of Gas Flow in Blast Furnace." *Computers, Materials and Continua* 195-216.
- Adema, Allert. 2014. *DEM-CFD Modelling of the ironmaking blast furnace*. Netherlands: CPI-Wöhrmann Print Service Zutphen.
- Agustin, Rahmania. 2017. *Studi Pengaruh Variasi Ketebalan Lapisan Burden Material Pada Pengolahan Bijih Nikel Laterit Di Mini Blast Furnace Terhadap Fenomena Transfer Momentum Menggunakan Finite Volume Method*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Astuti, W., Hirajima, T., Sasaki, K., & Okibe, N. 2018. "Comparison of atmospheric citric acid leaching kinetics of nickel from different Indonesian saprolitic ores." *Hydrometallurgy* Vol 161, 138–151.
- Babich, Alexander, dan Dieter Senk. 2019. "Coke in the iron and steel industry." Dalam *New Trends in Coal Conversion*, oleh Isabel Suárez-Ruiz, Maria Antonia Diez dan Fernando Rubiera, 375. Duxford: Elsevier.
- Chaigneau, R. 2009. *Modern Blast Furnace Ironmaking an Introduction*. 2. Ijmuiden: IOS Press.
- Chastain, S.D. 2000. *Iron Melting Cupola Furnaces for The Small Foundry*. Jacksonville: Stephen D. Chastain.
- Crundwell, Frank K., Michael S. Moats, Venkoba Ramachandran, Timothy Robinson, dan W. G Davenport. 2011. *Extractive Metallurgy of Nickel, Cobalt, and Platinum Group Metals*. Oxford: Elsevier.
- Dalvi, A.D, W.G Bacon, dan R.C. Osbourne. 2004. *The Past and the Future of Nickel Laterites*. Toronto: The Prospectors and Developers Association of Canada.
- der Ent, Van, A. Baker, A.J.M. Van Balgooy, dan A. M.M.J. Tjoa. 2013. "Ultramafic nickel laterites in Indonesia (Sulawesi, Halmahera): Mining, nickel hyperaccumulators and

- opportunities for phytomining.” *Journal of Geochemical Exploration* Vol 128, 72-79.
- Farkas, Ottó, dan Róbert Móger. 2012. *Metallographic Aspects of Blast Furnace Tuyere Erosion Processes*. Steel Research International.
- Ferziger, JH, dan M. Perić. 2002. “Computational methods for fluid dynamics.” *Springer* 426.
- Fu, D, Y Chen, Y Zhao, J D’Alessio, dan K. J & Zhou, C. Q. Ferron. 2014. “CFD modeling of multiphase reacting flow in blast furnace shaft with.” *Applied Thermal Engineering* 298-308.
- Geerdes, Marteen, Hisko Toxopeus, Cor van der Vliet, dan Ano. 2009. *Modern Blast Furnace Ironmaking: An Introduction*. Netherlands: IOS Press.
- Ghofoer, R.A. 2018. *Studi Pengaruh Variasi Laju Aliran Udara Pada Tuyere Mini Blast Furnace Kapasitas 10 Ton Bijih Per Hari Terhadap Distribusi Tekanan Dan Kecepatan Gas Menggunakan Dem-Cfd Couple Model*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Guo, Bao Yu, Paul Zulli, Daniel Maldonado, dan Aibing Yu. 2006. “Numerical Analysis of Gas Flow-Slag Surface Interaction in Blast Furnace.” *Fifth International Conference on CFD in the Process Industries; 2006; December*. Australia: CSIRO. 1-6.
- Hoatson, D. M., Jaireth, S., and Jaques, A.L. 2006. “Nickel sulfide deposits in Australia: characteristics, resources, and potential.” *Ore Geology Reviews* Vol 29, Page 177-24.
- Kamata, Muneyuki, Kenji Kumagai, Hideki Kawai, Jun Suzuki, Jun-ichiro Yagi, Shinroku Matsuzaki, dan Hiroshi. Nogami. 2015. “Formation of Vertically Inverse Pressure Distribution Due to Packing Structure of Near Wall Region of Blast Furnace.” *ISIJ International* 1327-1355.
- Khoo, J.K, Nawshad Haque, Geoff Woodbridge, Robbie McDonald, dan Sankar. Bhattacharya. 2017. “A life cycle

- assessment of a new laterite processing technology.” *Journal of Cleaner Production* Vol 142, page 1765-777.
- Kikuchi, Shin, Tatsuya Kon, Shigeru Ueda, Shungo Natsui, Ryo Inoue, dan Tatsuro. Ariyama. 2015. “Analysis of Powder Motion in a Packed Bed of Blast Furnace Using the Discrete Element Method.” *ISIJ International* 1313-1320.
- Kuang, S, M Zhou, dan A. Yu. 2019. “CFD-DEM modelling and simulation of pneumatic conveying: A review.” *Powder Technology* 2-23.
- Miao, Zhen, Zongyan Zhou, A.B. Yu, dan Yansong. Shen. 2017. “CFD-DEM simulation of raceway formation in an ironmaking blast furnace.” *Powder Technology* 542–549.
- Mitra, Tamoghna. 2016. *Modeling of Burden Distribution in the Blast Furnace*. Turku/Åbo, Finland. : Åbo Akademi University.
- Mitra, Tamoghna, dan H. Saxen. 2015. “Simulation of Burden Distribution and Charging in an Ironmaking Blast Furnace.” *IFAC* 183-188.
- Natsui, S. 2011. “Analysis on Non-Uniform Gas Flow in Blast Furnace Based on DEM-CFD.” *Steel research* pp. 964-971.
- Peacey, J.G., dan W.G. Davenport. 1979. *The iron blast furnace*. Oxford: Pergamon Press Ltd.
- Peiro, J, dan S. Sherwin. 2005. “Finite difference, finite element and finite volume methods for partial differential equations.” *Springer* 2415–2446.
- Polyakov, Oleg. 2013. *Technology of Ferronickel*. Dnipropetrovsk, Ukraine: National Metallurgical Academy of Ukraine.
- Rizki F, Mohammad. 2017. *Analisa Pengaruh Ukuran Diameter Large Bell Terhadap Deformasi Layer dan Distribusi Burden Material di dalam Mini Blast Furnace Kapasitas 250 Ton / Hari Menggunakan Solid Particle Model*. Surabaya: Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Samik, NAG, GUPTA Ankit, PAUL Sananda, GAVEL Dharm Jeet, dan AICH. Binayak. 2014. *Prediction of Heap Shape*

- 
- in Blast Furnace Burden Distribution*. Jamshedpur, India: ISIJ International.
- Sibatullin, Salavat K., Alexander S. Kharchenko, Leonid D. Devyatchenko, dan Valery L. Steblyanko. 2017. "Improvement of Iron Ore Burden Components Distribution when Charging into Blast Furnace Top by Physical and Mathematical Modelling of Fixed Effects." *Journal of Chemical Technology and Metallurgy* 694-701.
- Sousani, M, A. M. Hobbs, A. Anderson, dan R. Wood. 2019. "Accelerated heat transfer simulations using coupled DEM and CFD." *Powder Technology* 367-376.
- Swinbourne, D.R. 2014. "Understanding ferronickel smelting from laterites through." *Mineral Processing and Extractive Metallurgy* Vol 123.
- Umekage, Toshihiko, Masatomo Kadowaki, Shinichi Yuu, dan dll. 2007. "Numerical Simulation of Effect of Tuyere Angle and Wall Scaffolding on Unsteady Gas and Particle Flows Including Raceway in Blast Furnace." *ISIJ International* 659-668.
- Vångö, M, S Pirker, dan T. Lichtenegger. 2018. "Unresolved CFD-DEM modeling of multiphase flow in densely packed particle beds." *Applied Mathematical Modelling* 501-516.
- Yu, Y, dan H Saxén. 2013. "Experimental and DEM study of segregation of ternary size particles in a blast furnace top bunker model." *Steel Res* 1018-1033.
- Zhuo, Yuting, dan Yansong Shen. 2019. "Three-dimensional transient modelling of coal and coke co-combustion the dynamic raceway of ironmaking blast furnace." *Applied Energy* 261.
-

## LAMPIRAN

### Lampiran 1. Perhitungan Inner Volume MBF

Perhitungan inner volum MBF menggunakan rumus volume silinder

$$V = \pi r^2 \times h$$

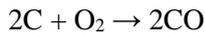
$$V = \pi (0,3\text{m})^2 \times 3,6\text{m}$$

$$V = 1,017 \text{ m}^3$$

### Lampiran 2. Perhitungan Kebutuhan Udara

Untuk perhitungan kebutuhan udara dapat diketahui dengan mencari kebutuhan oksigen, yaitu :

- Reaksi pembentukan CO dari C (CO yang dibutuhkan reaksi adalah 89,57357)

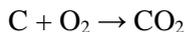


$$\text{Mol O}_2 = \frac{1}{2} \text{ mol CO} = \frac{1}{2} \text{ mol C}$$

$$= \frac{1}{2} \times 89,57357$$

$$= 44,78679 \text{ mol}$$

- Reaksi 1



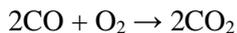
$$\text{Mol O}_2 = \text{mol C}$$

$$= (\text{wt\% fix C} \times \text{Massa batu bara} / \text{Ar C}) - (\text{mol C pembentukan CO})$$

$$= (42,35\% \times 17000 / 12,01) - 89,57357$$

$$= 466,7 \text{ mol}$$

- Reaksi 2



$$\text{Mol O}_2 = \frac{1}{2} \text{ mol CO}$$

$$= \frac{1}{2} \times (2 \times 466,7) \text{ mol}$$

$$= 466,7 \text{ mol}$$

Total kebutuhan oksigen setiap layernya adalah 978,234 mol

Karena di dalam udara mengandung 21% oksigen, maka jumlah mol udara yang dibutuhkan adalah:

- Kebutuhan Udara =  $978,234 \text{ mol} / 0,21$   
=  $4658,26 \text{ mol} \times 22,4 \text{ liter/mol.jam}$

$$\begin{aligned}
 &= 104344,97 \text{ liter/jam} \\
 &= 104,34497 \text{ m}^3/\text{jam} \\
 &= 1,739 \text{ m}^3/\text{menit} - \text{per layer}
 \end{aligned}$$

### **Lampiran 3. Perhitungan Jumlah Layer**

Perhitungan jumlah layer dalam inner volum:

Asumsi ketinggian *bed* 10cm di atas tuyser:

$$\begin{aligned}
 V_{\text{bed}} &= \pi r^2 \times 0,55\text{m} \\
 V_{\text{bed}} &= 0,155 \text{ m}^3 \\
 m_{\text{bed}} &= 0,155 \text{ m}^3 \times 1307 \text{ Kg/m}^3 \\
 m_{\text{bed}} &= 203,147 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

Asumsi awal rongga pada *bed* adalah 40%:

$$\begin{aligned}
 m_{\text{bed}} &= 203,147 \text{ Kg} \times 0,6 \\
 m_{\text{bed}} &= 121,7 \text{ Kg}
 \end{aligned}$$

Jadi untuk massa *bed* awal yang dibutuhkan adalah 122 Kg

$$\begin{aligned}
 \frac{V_{\text{ore}}}{\text{layer}} &= \frac{25}{1388 \text{ Kg/m}^3} = 0,0180 \text{ m}^3 \\
 \frac{V_{\text{coal}}}{\text{layer}} &= \frac{17}{1307 \text{ Kg/m}^3} = 0,0130 \text{ m}^3 \\
 \frac{V_{\text{dolomit}}}{\text{layer}} &= \frac{21}{1709 \text{ Kg/m}^3} = 0,0123 \text{ m}^3 \\
 V_{\text{layer}} &= (0,018 + 0,013 + 0,0123) \text{ m}^3 \\
 &= 0,0433 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

Asumsi awal *void* yang terjadi pada layer adalah 30%

$$\begin{aligned}
 V_{\text{layer}} &= 0,0433 \text{ m}^3 \times 130\% \\
 &= 0,0563 \text{ m}^3
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \text{Jumlah layer maks} &= V_{\text{inner}}/V_{\text{layer}} \\
 &= (1,017-0,155)/0,0563 \\
 &= 15,3
 \end{aligned}$$

Jadi kebutuhan udara untuk 15 layer adalah 26,6 m<sup>3</sup>/menit

### **Lampiran 4. Laju Aliran Udara**

Dalam penelitian ini, digunakan perbandingan dari laju aliran, yaitu debit udara (26.6 m<sup>3</sup>/menit) dengan *working volume blast furnace* (1.017 m<sup>3</sup>). Sehingga didapatkan variasi laju aliran atas dasar kebutuhan oksigen pada proses terhadap *off gas* yang ditunjukkan pada Tabel 1

**Tabel.1** Laju aliran 10 tuyer

Volume udara (m <sup>3</sup> /s)	0.45
Volume udara/tuyer (m <sup>3</sup> /s)	0.045
Laju aliran udara (m/s)	35.828

**Lampiran 5. Perhitungan voidage**

Perhitungan voidage pada layer:

$$\varepsilon = 1 - \frac{1}{V_0} \sum V_j$$

Dimana,

$V_0$  = Volume control

$V_j$  = 1,25E-04 m<sup>3</sup>

**Tabel 2.** Perhitungan Voidage

Variabel Sudut Tuyere		$\varepsilon$	$\Sigma$ partikel	$\Sigma V_j$	rata-rata $\varepsilon$
0°	0	35.840%	299	8.02E-05	35.312%
	10	36.320%	297	7.96E-05	
	20	35.680%	300	8.04E-05	
	30	34.560%	305	8.18E-05	
	40	34.160%	307	8.23E-05	
3°	0	35.840%	299	8.02E-05	35.392%
	10	35.440%	301	8.07E-05	
	20	35.200%	301	0.000081	
	30	34.800%	304	8.15E-05	
	40	35.680%	300	8.04E-05	
7°	0	36.080%	298	7.99E-05	35.456%
	10	35.680%	300	8.04E-05	
	20	35.680%	300	8.04E-05	
	30	34.800%	304	8.15E-05	
	40	35.040%	303	8.12E-05	
11°	0	35.840%	299	8.02E-05	36.208%
	10	36.320%	297	7.96E-05	

	20	36.720%	295	7.91E-05	
	30	35.200%	302	0.000081	
	40	36.960%	294	7.88E-05	

**Tabel. 3 Error Perhitungan Voidage**

0 derajat			7 derajat		
ε (perhitungan)	ε(aplikasi)	error	ε (perhitungan)	ε(aplikasi)	error
0.358400	0.358401	0.00028	0.360800	0.360801	0.00028
0.363200	0.363201	0.00028	0.356800	0.356802	0.00056
0.356800	0.356801	0.00028	0.356800	0.356802	0.00056
0.345600	0.345602	0.00058	0.348000	0.348001	0.00029
0.341600	0.341601	0.00029	0.350400	0.350401	0.00029
3 derajat			11 derajat		
ε (perhitungan)	ε(aplikasi)	error	ε (perhitungan)	ε(aplikasi)	error
0.358400	0.358401	0.00028	0.358400	0.358401	0.00028
0.354400	0.354402	0.00056	0.363200	0.363201	0.00028
0.352000	0.352001	0.00028	0.367200	0.367201	0.00027
0.348000	0.348001	0.00029	0.352000	0.352002	0.00057
0.356800	0.356802	0.00056	0.369600	0.369601	0.00027

**Lampiran 5. Perhitungan *pressure drop***

Perhitungan *pressure drop* menggunakan pendekatan persamaan Ergun yaitu

$$\frac{\Delta P}{H} = \Psi \frac{1 - \varepsilon \rho}{\varepsilon^3} \frac{1}{d} w^2$$

Dimana *friction factor*,

$$\Psi = 1,75 + \frac{150}{Re'}$$

Untuk  $Re'$

$$Re' = \frac{\rho \cdot w \cdot d}{\mu(1 - \varepsilon)}$$

$$Re' = 1,225 \times 2.16 \times \frac{0.008}{0.000019876 \times (1 - 0,36208)}$$

$$= 1669,49$$

$$\Psi = 1.75 + 110 / 1669,49$$

$$= 1,81$$

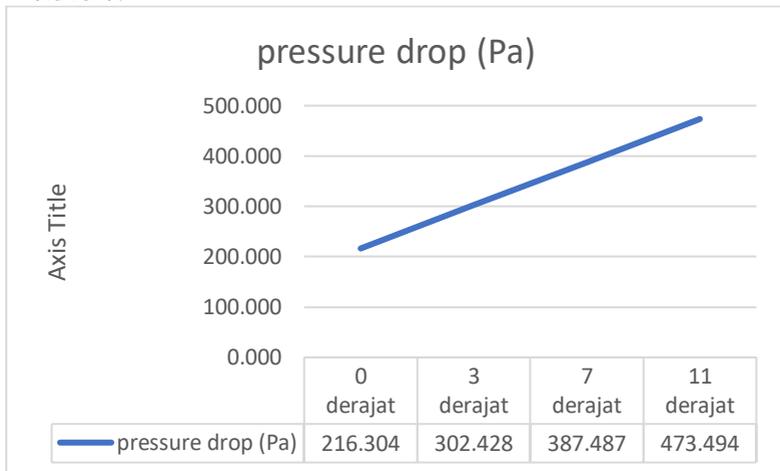
$$\Delta P = 1.81 \times (1,225 / 0.008) \times ((1-0,36208)/0,36208^3) \times 2,16$$

$$= 302,428 \text{ Pa}$$

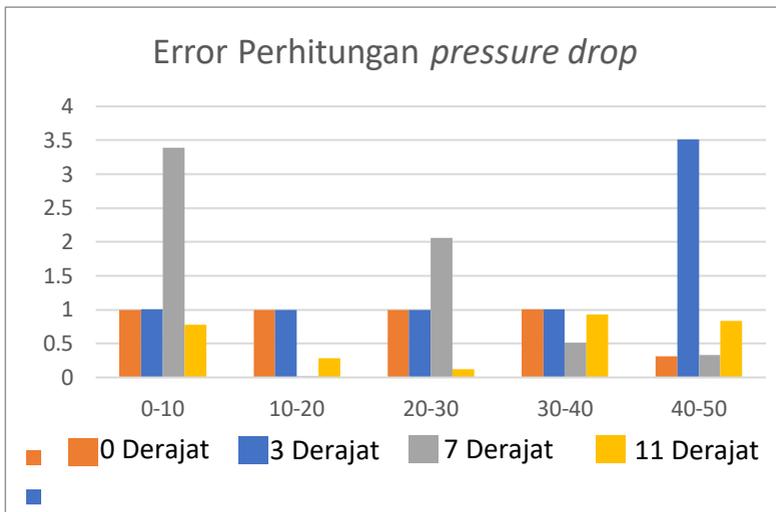
Error perhitungan manual dengan analisis =

$$\text{Error} = 100\% \times (311,774 - 302,248) / 311,774$$

$$= 0.315 \%$$



**Gambar 1.** Grafik *pressure drop*



**Gambar 2.** Grafik error perhitungan *pressure drop*

### **Lampiran 6. Perhitungan volume *raceway***

Perhitungan *raceway* dilakukan dengan menghitung massa *coal* yang berpindah pada area terbentuknya *raceway* sebelum dan sesudah laju aliran diberikan

$$Volume = \frac{Massa\ partikel\ sebelum - Massa\ partikel\ sesudah}{Massa\ jenis\ partikel}$$

Contoh perhitungan *raceway* untuk variasi 3 derajat :

$$Volume = \frac{2.87\ kg - 0.620\ kg}{1307.18\ \frac{kg}{m^3}} = 0.00172\ m^3$$

**Tabel 4.** Perhitungan *Raceway*

	0 derajat	3 derajat	7 derajat	11 derajat
volume	0.00158	0.00172	0.00184	0.00175
massa	0.807	0.62	0.467	0.585

## UCAPAN TERIMA KASIH

Atas rahmat Allah SWT yang maha kuasa, pada pengerjaan laporan tugas akhir ini saya mengucapkan terima kasih sebesar-sebesarnya kepada:

1. Keluarga saya. Ayah, Mama, Nisrina, dan Arini yang sudah memberi doa dan dukungan secara moral maupun material selama pengerjaan laporan tugas akhir ini.
2. Bapak Lukman Noerochim S.T, M.Sc.(Eng),Ph.D dan Bapak Sungging Pintowantoro, Ph.D. selaku dosen pembimbing Tugas Akhir penulis yang telah membimbing dan memberikan banyak ilmu selama pengerjaan tugas akhir ini.
3. Bapak Sigit Tri Wicaksono, S.Si., M.Si., Ph.D., selaku Ketua Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTI-ITS.
4. Dr. Eng. Hosta Ardhyanta ST., M.Sc. selaku Koordinator Tugas Akhir Jurusan Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS.
5. Ir. Moch Farid, DEA. Selaku dosen wali yang selalu membantu dan mengayomi penulis selama menjadi mahasiswa di Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS
6. Bapak Fakhreza Abdul, S.T., M.T. selaku dosen Laboratorium Pengolahan Mineral yang selalu memberi inspirasi penulis selama pendidikan di Departemen Teknik Material dan Metalurgi dan juga mengingatkan penulis untuk mengerjakan Tugas Akhir.
7. Seluruh dosen dan karyawan Departemen Teknik Material dan Metalurgi FTIRS-ITS yang telah memberikan pengetahuan dan pembelajaran kehidupan
8. Ninik Safrida yang selalu memberikan support dan mendengarkan curhatan dan keluh-kesah penulis.
9. Farhan Arif Budiman sebagai sobat selama di kos perumdos yang juga sering membantu penulis selama berada di ITS.
10. Kontrakan Mbambet beserta member-member : Yoga, Rafli, Vito, Afrizal, Arfan, Putra, Wardhana, Satrio, Iqbal, Handis, Nabil, Edwin, Daniel, Henokh, Arif, Erick, Fadhel, Cici,

---

Yanne, Mirfa yang selalu meramaikan kontrakan setiap hari dan juga menjadikan tempat paling nyaman untuk beristirahat dan melepas penat.

11. Tim Kesma Konsen 17/18. Fungsi : Mas Ihzat, Mas Ihsan, Mas Galih, Mas Umam, Mas Ayat, dan Mbak Firdos beserta sobat-sobat staff : Kristin, Yoga, Bayu, Wardhana, Rafdi, Aim, Vito dan Ghози yang sudah bekerja keras dan membimbing penulis selama kepengurusan dari raker hingga LPJ.
  12. Sobat-sobat Kesma RAPI 18/19, Yoga, Kristin, Vito, dan Wardhana dan staff-staff : Rino, Kevin, Nur Hanifah, Wahyu, Thoriq, Faridz, dan Alwi yang sudah bekerja keras selama kepengurusan berlangsung dari raker hingga LPJ.
  13. Stage and Project Band, Zizi, Gefin, Fadhel, dan Jati yang selalu mengisi waktu luang untuk nge-band selama perkuliahan.
  14. Sobat Lab. Ekstraksi 2019/2020 Najib, Erick, Vito, Naim, Iqbal, Tetty, Satrio, Falfir, Afni, Nanta, Fira, Henokh, Kepin, Radite, Fadel, Naufal, Amri, dan Mas Berryl yang selalu meramaikan lab setiap hari sebelum wabah COVID-19
  15. Partner TA pemodelan M Najib Hibatullah Pratama, yang telah membantu dalam pengerjaan simulasi pemodelan maupun dalam mendengarkan curhatan penulis
  16. Mas Arif Tri Kurniawan, Mas Rachmad Abdhael Ghoefoer, Iyando, Akhlish, Afrizal dan Mas Dimas yang senantiasa memberi wawasan dalam penulisan Tugas Akhir
  17. Sahabat-sahabat Sukseker's : Kartika, Kevin, Danur, Salsa, Sabrina, Firnas, dan Agus yang selalu menjadi sahabat jadi zaman SMP
  18. Teman-teman MT18 yang telah menemani dan membuat banyak cerita selama berkuliah di ITS, khususnya di Departemen Teknik Material dan Metalurgi.
  19. Mas/Mbak MT17, MT16 dan MT15 yang sudah saya anggap sebagai kakak selama perkuliahan
  20. Adek-adek MT19 dan MT20 yang sedang menimba ilmu dalam menjalani perkuliahan di DTMM.
-

## BIODATA PENULIS



Penulis dilahirkan di Batam, 22 Maret 1998, merupakan anak pertama dari 3 bersaudara. Penulis telah menempuh pendidikan formal di SD Rimba Putra, SMP Negeri 6 Bogor, dan SMA Negeri 5 Bogor. Setelah lulus dari SMA penulis melanjutkan studinya melalui jalur SNMPTN di Departemen Teknik Material dan Metalurgi Fakultas Teknologi Industri dan Rekayasa Sistem Institut Teknologi Sepuluh Nopember Surabaya pada tahun 2016-2020. Selama berkuliah di Departemen Teknik Material dan Metalurgi penulis pernah aktif dalam beberapa kegiatan kampus. Organisasi yang pernah diikuti penulis ialah staff Kesejahteraan Mahasiswa HMMT FTI-ITS 17/18 dan Fungsiaris HMMT FTI-ITS 18/19. Penulis juga memiliki pengalaman kerja praktik di PT Indonesia Asahan Aluminium (Persero). Tugas akhir yang dikerjakan penulis di bidang Pemodelan Pengolahan Mineral dengan judul “Analisis Fenomena Multifasa *Mini Blast Furnace* Kapasitas 10 Ton Per Hari Terhadap Distribusi Fasa, Tekanan, Dan Kecepatan Gas Dengan Variasi Sudut *Tuyere* Menggunakan *Dem-Cfd Coupled Model*.”

Email : rizkisumantri98@gmail.com

